

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Obor N3106
Řízení jakosti
Katedra materiálového inženýrství

VYUŽITÍ PEVNOSTI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN VE SVAZKU

USAGE STRENGTH OF BASALT FIBERS IN BUNDLE

Bc. Jitka Štěpánková
KTM - 515

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Kovačič

Počet stran textu:	48
Počet obrázků:	21
Počet tabulek:	19
Počet příloh:	5

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č.121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Bc. Jitka Štěpánková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Vladimíru Kovačičovi za odborné vedení při zpracování diplomové práce a za jeho velmi cenné rady a připomínky. Dále děkuji celé Katedře textilních materiálů, za pomoc při realizaci experimentální části této práce a mnoho cenných rad, které mi poskytli.

Zvláštní poděkování patří i mým rodičům za jejich péči a bezmeznou podporu během celého mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá stanovením využití pevnosti čedičových vláken svazku. Byla zkoumána vlákna s lubrikací i bez lubrikace.

Teoretická část je zaměřena na statistickou teorii pevnosti pro křehká vlákna. Obsahuje také poznatky o vlastnostech čedičových vláken a jejich použití

V experimentální části je popsáno měření průměru a pevnosti a tažnosti. Výsledky jsou vyhodnoceny a jsou modelovány závislosti naměřených a vypočtených hodnot na upínací délce materiálu

Annotation

Diploma thesis deal with assesment usage strength of basalt fibers in bundle. There were surveyed fibres with size also without size.

Theoretical part is specialized on statistical theory breaking strength for breakable fibres. It also contains information about properties of basalt fibres and their using.

The experimental part provides measuring of fibre diametre, strength and tensility. The results are summed up and the model of measured and calculated values depending on fixative longitude is provided.

Klíčová slova

Čedičové vlákno

Basalt fibre

Pevnost

Strength

Tažnost

Tensibility

Modul pružnosti

Elongation modulus

Svazková pevnost

Bundle strength

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ	7
ÚVOD	8
1. ROZDĚLENÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN	9
2. HISTORIE A VÝVOJ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN	10
2.1 Nekonečná čedičová vlákna	10
2.2 Mineralogické složení čedičových hornin	11
3. VLASTNOSTI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN	13
3.1 Struktura čedičových vláken	13
3.2 Mechanické vlastnosti	14
3.2.1 Pevnost v tahu a tažnost	14
3.2.2 Modul pružnosti	16
3.3 Chemické složení	17
3.4 Chemické vlastnosti	18
3.5 Tepelná odolnost a tepelně izolační vlastnosti	18
3.6 Zvukově izolační vlastnosti	18
3.7 Použití čedičových vláken v průmyslu	19
3.8 Čedičová vlákna a životní prostředí	19
4. STATISTICKÁ TEORIE PEVNOSTI PRO KŘEHKÁ VLÁKNA	20
4.1 Weibullova statistická teorie pevnosti pro křehká vlákna	21
4.1.1 Odhad svazkové pevnosti z hodnot měření pevnosti jednotlivých vláken	21
4.1.2 Distribuce pevností svazků vláken	22
4.2 Využití substanční pevnosti a tažnosti	24
4.3 Model pevnosti a tažnosti předpokládající normální rozložení	24
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
5.1 Charakteristika materiálu	27
5.2 Příprava vzorků	27
5.3 Zjišťování průměru vláken	28
5.4 Měření pevnosti v tahu a tažnosti	29
6. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT	31
6.1 Základní statistika	32
6.2 Stanovení pravděpodobnostního modelu	37
6.3 Gaussovský model pevnosti a tažnosti vláken	38
6.4 Model s Weibullovou distribucí pevnosti vláken	39
6.5 Porovnání dvou výběrů	42
7. ZÁVĚR	44
POUŽITÁ LITERATURA	46
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	48

SEZNAM SYMBOLŮ

A_{\max}, ε	[%]	tažnost vlákna
d	[μm]	průměr vlákna
E	[MPa]	Yongův modul pružnosti
F, F_{\max}	[N]	absolutní síla
F_r	[N.tex ⁻¹]	relativní síla
IS dolní		dolní interval spolehlivosti
IS horní		horní interval spolehlivosti
l	[mm]	konečná délka po protažení
l_0	[mm]	upínací délka
max		maximální hodnota
min		minimální hodnota
r		korelační koeficient
r_w		korelační koeficient Weibullova rozdělení
s		směrodatná odchylka
S	[m ²]	plocha průřezu vlákna
t	[s]	čas
T	[tex]	jemnost vlákna
T	[°C]	teplota
v	[%]	variační koeficient
W	[J]	práce
\bar{x}		aritmetický průměr
σ	[Pa]	napětí
η	[%]	využití pevnosti
ρ	[kg.m ⁻³]	měrná hmotnost

ÚVOD

Mezi nejběžnější horniny na povrchu Země patří čedičové horniny. Ty se nachází v několika geotektonických prostředích, např. na středooceánských hřbetech, ostrovních obloucích, ale i v driftových zónách. Čediče jsou převážně výsledkem tavení svrchního pláště Země (v hloubkách 40 – 200 km). [1]

Nejrozšířenější použití je jako kamenná drť používaná ve stavebnictví nebo v silničním stavitelství. V současnosti čedič především nahrazuje výrobky z azbestu a to zejména díky své zdravotní nezávadnosti. V řadě vlastností, jako je pevnost, modul pružnosti, chemická a teplotní odolnost, čedičová vlákna výrazně předčí skleněná vlákna. Svým vzhledem se čedičová vlákna podobají uhlíkovým, která jsou však mnohem dražší. Pro určité aplikace mohou být uhlíková nebo aramidová vlákna nahrazena čedičovými vlákny, což vede k podstatnému zlevnění materiálu.

Ve srovnání s ostatními speciálními vlákny mají skleněná a čedičová vlákna nižší náklady na výrobu. Tato skutečnost je dána bohatou surovinovou základnou jak u nás, tak i v dalších zemích a vyvíjením nových technologií snižujících energetickou náročnost tažení vláken.

Tato diplomová práce rozebírá problém svazkové pevnosti čedičových vláken, který je pro technické využití tohoto materiálu velmi důležitý, hlavně v oblasti s vysokými nároky na mechanické vlastnosti. Zároveň v ní jsou porovnávány pevnosti vláken s lubrikací a bez lubrikace, totéž i u svazků vláken. Použitá vlákna s lubrikací jsou od výrobce Kamenný Věk

1. ROZDĚLENÍ ANORGANICKÝCH VLÁKEN

K rozdělení vláken je možné přistupovat dle různých hledisek, např. podle účelu[2]:

- a) vlákna pro oděvní aplikace
- b) vlákna pro technické účely

U vláken pro oděvní aplikace jsou rozhodující vlastnosti související s fyziologickými projevy, povrchovými vlastnostmi a mechanickými vlastnostmi, které ovlivňují pocity při nošení. Pro vlákna využívaná k výrobě technických textilií jsou za rozhodující vlastnosti považovány vysoká pevnost, vysoký modul pružnosti, malá tažnost do přetrhu, odolnost vůči vysokým teplotám, chemikáliím a různým druhům záření.

Pro splnění těchto požadavků je potřeba využít speciálních vláken. Anorganická vlákna patří do skupiny vysoce výkonných vláken, která jsou tříděna do podskupin[2]:

- vysoce pevná vlákna
- vlákna s vysokým modulem
- vlákna s vysokou tepelnou odolností

Vysoce pevná vlákna se vyznačují zejména vysokým počátečním modulem E , extrémně vysokou pevností a nízkou tažností, poměrně nízkou odolností vůči stlačení a ohybu, odolností vůči zvýšeným teplotám, působení chemikálií, oxidaci a většinou jsou nehořlavá. Do této skupiny patří vlákna keramická, uhlíková, skleněná, kovová a monokrystaly. Základními oblastmi použití jsou kompozitní struktury, ochranné oděvy a technické textilie (kosmos, letadla, lodě).

Vlákna s vysokým modulem jsou charakteristická svými vysokými moduly pružnosti. Z hlediska anizotropie modulů tyto vlákna rozdělujeme do dvou skupin:

- keramická, skleněná vlákna
- organická, uhlíková a čedičová vlákna

Sklo a keramická vlákna jsou prakticky izotropní tzn., že modul pružnosti E je ve všech směrech stejný. Uhlíková a organická vlákna mají naopak velmi silnou anizotropii modulu pružnosti.

Vlákna s vysokou tepelnou odolností bývají většinou vystavována extrémně vysokým teplotám (250-2000°C). Tepelnou odolnost posuzujeme nejen podle maximální tepelné expozice, ale také podle doby působení. Do této skupiny patří především vlákna z karbidu křemíku, vlákna z bóru, uhlíku, keramiky a z bórnitridu.

2. HISTORIE A VÝVOJ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN

Rozlišujeme tři základní druhy hornin: vyvřelé, usazené a přeměněné, jež vznikají různým způsobem. Čedič je příkladem výlevné vyvřelé horniny vzniklé z magmatu, které chladne a tuhne na zemském povrchu. Jeho chemické složení je velmi podobné sopečnému vlákně. Některé sopky vyvrhují lávu s takovým složením a viskozitou, že je za větrných podmínek roztrhávána na vlákna. Označuje se jako horninová vata.

Snadné průmyslové zpracování vyvřelých hornin je dané jejich dostatečnou tekutostí při teplotách obvykle užívaných v metalurgii. Díky tomu se dají snadno zpracovat na vlákno. Výroba těchto vláken začala prudce stoupat ve vyspělých státech po druhé světové válce.

2.1 Nekonečná čedičová vlákna

Od třicátých let minulého století byla čedičová vlákna produkována ve formě vláknenné stříže. Poté co byly zjištěny jeho výtečné vlastnosti se středem zájmu stala snaha vyrobit nekonečné vlákno. To se podařilo až v osmdesátých letech v Rusku.

S růstem nároků na nové textilní technické výrobky, především zvýšenými požadavky na jejich tepelnou a chemickou odolnost, se rozšiřuje oblast uplatnění čedičových vláken s vynikajícími vlastnostmi za přijatelnou cenu.

Čedičová vlákna jsou složena do svazku nekonečně dlouhých fibril vzniklých zvlákněním taveniny anorganického materiálu vhodného složení. Jsou vysoce pevná, ohebná a využitelná na výrobu technických výrobků ve všech odvětvích průmyslu.

Nekonečná čedičová vlákna ve formě technického hedvábí nachází hlavní uplatnění v textilním zpracování na nitě – roving, čedičové nitě skané, druzené a kordy. Tato čedičová příze se dále zpracovává na plošné a délkové textilní technické útvary – provazce, hadice a popruhy a prostorové textilní technické útvary[3].



Obr. 1 Roving

2.2 Mineralogické složení čedičových hornin

Čedičová hornina obsahuje pyroxeny (augit, titanaugit), plagioklasy (labradorit – anortit) a olivín.



Obr. 2 Čedič

Pyroxeny jsou jedním z mnoha zástupců velké skupiny horninotvorných nerostů. Je pro ně charakteristická téměř dokonalá štěpnost a dobrá tavitelnost. Hlavním představitelem pyroxenů je augit.



Obr. 3 Augit

Augit má černohnědou až černou barvu, jeho tvar tvoří krátké sloupcovité krystaly s osmiúhelníkovým průřezem. *Složení:* obsahuje kyslíčníky kovů a SiO_2

Magnetit je nejstarší známou látkou s magnetickými vlastnostmi. Je odhadováno, že tato ruda železa tvoří dokonce až 2 % objemu zemské kůry. Má zrnitou strukturu s černým lesklým vzhledem. *Složení:* směs FeO a Fe_2O_3



Obr. 4 Magnetit

Olivín je žlutozelený až olivově zelený nerost se skelným leskem a krystalovým povrchem. Je to křemičitan, který má proměnlivý podíl hořčíku a železa. Stejně jako magnetit je olivín těžce tavitelný nerost. *Složení:* $(\text{Mg, Fe}) \text{Si}_2\text{O}_4$. [4]



Obr. 5 Olivín

Plagioklasy neboli sodnovápenaté živce jsou směsí albitové a anortitové složky. Tvoří v hornině větší krystaly, které jsou známé svými vícenásobnými změnami ve složení od středu k okraji. *Složení:* albit - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ anortit - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. [5]



Obr. 6 Plagioklas

3. VLASTNOSTI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN

Čedičová vlákna jsou hladká, s plným kruhovým průřezem a sklovitou strukturou. U vláken, ve kterých nastala krystalizace, lze nalézt vysokou křehkost a lámavost. Barevný vzhled čedičových vláken je dán použitím surovin při výrobě. Mohou být hnědá, žlutá, hnědozelená, žlutohnědá atd. Délka vláken je dána výrobou.

Čedičové vlákno může být vyrobené jako stříž o průměrné délce 50 – 90mm nebo jako nekonečné vlákno.



Obr. 7 Lom čedičového vlákna

3.1 Struktura čedičových vláken

Struktura čedičových vláken stejně jako skleněných je téměř stejnorodá a sklovitá. Jako skleněná vlákna obsahují nevláknité příměsi – granálie. Jsou to nevytažené zbytky taveniny ve tvaru kuliček a jehliček. Granálie jsou často nežádoucí a má jich být co nejméně. Jejich množství závisí na technologických vlastnostech taveniny při výrobě. Ve struktuře se objevují i uzavřené malé bublinky, které mají obvykle protáhlý tvar ve směru délky vlákna. V některých případech se objeví i začínající krystalizace. Vlákná u kterých nastala krystalizace, jsou křehká a snadno se lámou. [6]

3.2 Mechanické vlastnosti

Pro popis mechanických vlastností je důležitý popis odolnosti v tahu (pevnosti) a deformační odezvy vláken (tažnosti) [8].

V následující tabulce č. 1 je uvedeno porovnání pevnosti čedičových vláken se skleněnými vlákny, která mají podobnou sklovitou strukturu.

Tab. 1 Porovnání fyzikálních vlastností čedičového a skleněného vlákna

Vlastnosti fyzikální	Čedič	Sklo
Hustota (při 20°C) /kg.m ⁻³ /	2 900	2 600
Navlhavost /%/	0,5	1,0
Modul pružnosti v tahu /MPa/	100 000	70 000
Pevnost v tahu /MPa/	1 850 až 2150	1 850 až 2150
Pevnost v tlaku /MPa/	300	300

3.2.1 Pevnost v tahu a tažnost

Pevnost v tahu patří mezi základní vlastnosti charakterizující vlákno. Při zjišťování pevnosti se zatěžuje vlákno postupně. Nejdříve dojde k porušení vlákna a následně k jeho přetržení. Maximální hodnoty přetržení se označují jako pevnost a tažnost vlákna [8].

Pevnost je definována buď jako relativní síla (síla do přetrhu) Fr [N/tex] nebo jako napětí do přetrhu σ_p [GPa]. Tažnost je pak deformace do přetrhu ε_p [%]. Relativní pevnost $Fr = P/T$ [N/tex].

Tažnost je definována jako největší možná deformace, které je dosaženo při přetrhu vlákna. Při natahování vzorku vlákna dochází k jeho deformování. Absolutní deformace se vyjadřuje v absolutních jednotkách jako Δl [mm]. Místo protažení l se používá relativního vyjádření:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

Působí-li na vlákno postupně rostoucí síla, dochází k růstu prodloužení až do bodu přetrhu. Charakteristickými hodnotami pracovního diagramu je počáteční modul E (derivace v počátku) a souřadnice bodu přetrhu označované jako pevnost a tažnost.

Vlákno původní délky l_0 a plochy příčného řezu S_0 je působením síly F prodlouženo na délku l a zúženo na plochu příčného řezu S . Místo absolutní síly F [N]

se používá relativní síla F_r resp. napětí σ . Relativní síla je vyjádřena jako síla na jednotku jemnosti, tj.

$$F_r = \frac{F}{T} = \frac{F}{S * \rho} \text{ [N/tex]} \quad (2)$$

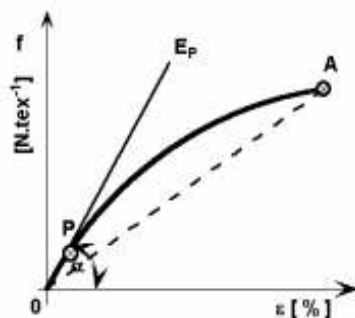
Napětí se vyjadřuje jako poměr síly na jednotku plochy příčného řezu, tj.

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [N/m}^2\text{]} = \text{[Pa]} \quad (3)$$

Platí, že $\sigma = F_r * \rho$ resp. $F_r = \sigma / \rho$ [MPa] = [N/tex] * [kg/m³]

3.2.2 Modul pružnosti

Modul pružnosti je první derivací funkce tahové křivky, jinými slovy tečna ke křivce v počátku. U textilií je místo pojmu Youngův modul pružnosti používán pojem počáteční tangentový modul E_p . Bod P, kde tečna v počátku opouští tahovou křivku je pak definován jako mez pružnosti, jak ukazuje obr.8.



Obr. 8 Modul pružnosti

3.3 Chemické složení

Vyvřelé horniny jsou převážně křemičitanové povahy. Mají podobné chemické složení, které se u jednotlivých typů liší pouze zastoupením jednotlivých složek. Rozptyl chemického složení Kamenného Věku je uveden v následující tabulce č. 2. [9]

Tab. 2 Složení Kamenný Věk [hm %]

Složení	Basalt KV [2, 3]
SiO₂	52,8 - 56,47
Al₂O₃	17,5 - 20,13
CaO	7,78 - 8,59
MgO	2,43 - 4,63
B₂O₃	-
Na₂O	2,46 - 3,34
K₂O	1,46 - 1,87
TiO₂	0,98 - 1,38
Fe₂O₃	10,3
F₂	-
FeO	6,36
MnO	0,15 - 0,16
P₂O₅	0,28
Cr₂O₃	0,06

Přítomnost oxidů výrazně ovlivňuje vlastnosti taveniny a vláken z něj vyrobených:

- **Oxid křemičitý(SiO₂)** zvyšuje hodnotu tavicí teploty a viskozitu taveniny.
- **Oxid hlinitý(Al₂O₃)** zvyšuje tavicí teplotu a viskozitu taveniny, jeho zvýšený obsah způsobuje, že jsou vlákna křehčí a kratší, avšak odolnější proti vlivům zvýšených teplot a teplotním změnám. Lépe odolávají chemickým vlivům i vodě.
- **Oxid vápenatý(CaO)** snižuje viskozitu taveniny. Zvyšuje tavicí teplotu. Vzniklé vlákno je krátké, křehké, CaO snižuje chemickou a hydrolytickou odolnost vláken.
- **Oxid hořečnatý(MgO)** působí ještě intenzivněji než oxid vápenatý.

3.4 Chemické vlastnosti

Chemická odolnost vláken je dána jejich chemickým složením, technologií výroby, povrchovou úpravou a působením chemikálií. Čedičová vlákna jsou vysoce odolná vůči vlhkosti a vodě, neboť obsahují málo OH-skupin. Dále výborně odolávají louhům, a to i koncentrovaným. Ve srovnání se skleněnými vlákny jsou však méně odolná vůči kyselinám.

Tab. 3 Chemický rozbor čedičového vlákna

Přibližný chemický rozbor čedičového vlákna	
Složka	Čedičové vlákno (% hmot.)
SiO ₂	52,0
Al ₂ O ₃	17,2
CaO	8,6
MgO	5,2
Fe ₂ O ₃	< 5
Na ₂ O	< 5
K ₂ O, TiO ₂	< 1
Cr ₂ O ₃ , CoO, NiO	< 0,1

3.5 Tepelná odolnost a tepelně izolační vlastnosti

Čedičová vlákna ve formě čedičové vaty patří k výborným tepelným izolátorům. Jsou nehořlavá, silně tlumí pronikající oheň a plameny. Dlouhodobě odolávají teplotám do 700°C. Tepelná vodivost čedičových vláken se pohybuje od 0,03 do 0,04 W.m⁻¹K⁻¹ při teplotě 20°C. Tepelně izolační vlastnosti jsou až trojnásobně lepší než u vláken vyrobených z azbestu.

3.6 Zvukově izolační vlastnosti

Čedičová vata je dobrým zvukově izolačním materiálem. Jejich vynikající zvuková pohltivost je dána vysokou pórovitostí vláknenné spleti.

3.7 Použití čedičových vláken v průmyslu

S využitím čedičových nekonečných vláken a čedičových textilií z nich zhotovených je možno počítat ve všech oblastech, kde se běžně dosud používají skleněná a používala azbestová vlákna. Vzhledem k tomu, že čedičová vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová, je to základní předpoklad k jejich masivnímu rozšíření v technické praxi.

Příklady uplatnění nekonečných čedičových vláken a z nich vyrobených textilních útvarů v průmyslové praxi

- plná náhrada skleněných vláken při výrobě tkanin pro stavebnictví
- geotextilie, armovací tkaniny a vlákna
- tepelně-izolační směsi ve stavebnictví pro žáruvzdorné stavební hmoty,
- výztužné tkaniny v kompozitech a sekaná vlákna v plastických hmotách v různých technických výrobcích
- izolace tepelné, zvukové a chemické (stavebnictví, letecký průmysl, elektrárny)
- ochranné žáruvzdorné a kyselinovzdorné pracovní oděvy do provozů s velkou tepelnou zátěží a s agresivním chemickým prostředím
- bytové a interiérové nehořlavé textilie

3.8 Čedičová vlákna a životní prostředí

Dalšími přednostmi jsou nezanedbatelné ekologické a zdravotní výhody proti obdobným vláknům. Především menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci, menší zdravotní riziko při zpracování a používání.

Čedičová vlákna jsou plnohodnotná náhrada azbestových a skleněných vláken v různých průmyslových aplikacích. Jako přírodní materiál, zpracováváný bez dalších přísad, se dají stoprocentně recyklovat. Čedič je nerost v přírodě se bohatě vyskytující ve formě vhodné ke zvlákňování. Celkově je výroba energeticky méně náročná než výroba skleněných vláken. Čedičová vlákna jsou tedy menší zátěž pro životní prostředí jak při výrobě tak i při jejich likvidaci.

Čedičová vlákna vyráběná ve formě nekonečných vláken nejsou zdraví škodlivá. Nejsou ani fibrogenní, ani karcinogenní. Minimální průměr těchto vláken je 9 μm . Vlákna s těmito rozměry nemohou být jako nebezpečná vdechována a podle mezinárodního hodnocení nepatří tedy mezi nebezpečné materiály. Obecně se uvádí, že vlákna se stávají nebezpečnými, když jsou vdechována hluboko do plic, a to se děje u vláken menších než 3 μm .

4. STATISTICKÁ TEORIE PEVNOSTI PRO KŘEHKÁ VLÁKNA

Pevnost vláken je jedna z problémových vlastností, protože ji nelze jednoznačně fyzikálně definovat. Díky nahodilé struktuře molekul má pevnost statisticky náhodný charakter.

Statistická teorie pevnosti je založena na předpokladu nejslabšího článku. Tento předpoklad znamená, že pevnost není závislá na počtu ani distribuci defektů ve vlákně, ale je závislá na maximálním defektu, který se v namáhaném průřezu vzorku vyskytuje. Maximální defekt může být dán např. trhlinami či nehomogenitou ve vlákně, rozhraním mezi krystalickými a amorfními oblastmi ve struktuře atd. [9]

Základní myšlenky statistické teorie pevnosti lze shrnout do několika bodů[10]:

- 1) V různých vzorcích téhož materiálu, připravených stejnou technologií se vyskytují defekty s rozdílným stupněm nebezpečnosti.
- 2) Nebezpečnost defektu roste s jeho velikostí. Čím je větší velikost defektu, tím menší je pravděpodobnost jeho výskytu.
- 3) Čím větší je objem vzorku, tím vyšší je pravděpodobnost výskytu nebezpečného defektu, tzv. rozměrový efekt.
- 4) Pevnost je určena nejnebezpečnějším defektem.

Pokud je pevnost ve všech mikroobjemech stejná, tak k poruše vlákna dojde v takové oblasti, ve které je jako první překročena kritická doba napětí. Není-li pevnost stejná, začne docházet k porušení vlákna jak v místech, kde je překročena kritická hodnota napětí, tak v místech, v nichž je oslabena struktura.

Ze statistické teorie vyplývá, čím větší povrch materiálu je namáhán, tím menší je pevnost. Tento jev je nazýván rozměrovým efektem.

Statistická teorie pevnosti kvantitativně popisuje statistická rozložení pevnosti. Rozložení pevnosti jsou v různých statistických teoriích pevnosti popsána různými pravděpodobnostními funkcemi a rozdílným kvantitativním vztahem pro rozměrový efekt.

4.1 Weibullova statistická teorie pevnosti pro křehká vlákna

Teorie je často využívána pro výpočet svazkové pevnosti ve tkaninách určených do kompozitních materiálů [11,12]. Tkanina z vláknenných svazků výrazně přispívá k vlastnostem kompozitu. Pomocí Weibullova rozdělení lze popsat rozdělení pevnosti vláken [11].

Na Weibullovu teorii pevnosti jednotlivých vláken navazuje Danielsův model pro výpočet **pevnosti vláknenných svazků**. Daniels [12] dokázal, že rozdělení pevnosti velkých svazků vláken je asymptoticky normální.

Zlepšení jeho teorie pak navrhli Smith a Barbour [12]. Upravili vztahy pro asymptotický průměr a směrodatnou odchylku.

4.1.1 Odhad svazkové pevnosti z hodnot měření pevnosti jednotlivých vláken

Teorie je určena pro odhadnutí pevnosti svazku s dostatečně velkým počtem vláken, pokud je známo rozdělení pevnosti a tažnosti vláken [13].

Pevnost svazku textilních vláken je vždy nižší než průměrná pevnost jednotlivých vláken. Nižší pevnost svazku vyplývá z nerovnosti prodloužení jednotlivých vláken. Pevnost svazku může být přesto odhadnuta z hodnot pevnosti jednotlivých vláken.

Pro teoretický odhad svazkové pevnosti Peirce [13] předpokládal, že pracovní křivky všech vláken ve svazku jsou lineární a téhož sklonu. Zatížení P na svazek při prodloužení a může být vyjádřeno jako

$$P = N \cdot E \cdot a \cdot T \int_a^{\infty} \varphi(a) da, \quad (4)$$

kde N je celkový počet vláken ve svazku, E je modul pružnosti vláken, T lineární hustota vláken a $\varphi(a)$ je distribuční funkce tažnosti vláken. Integrál představuje podíl nepřetržených vláken při protažení svazku a . [10,15]

Nachane a Iver [13] provedli zobecnění Peirceovy metody. Zobecněná teorie vede ke vzorci pro odhad svazkové pevnosti, i když pracovní křivky všech vláken ve vzorku nejsou stejné (mají jiný počáteční modul).

Definujeme hustotu pravděpodobnosti $\varphi(a)$ tažnosti vláken. Pak $\varphi(a)da$ je pravděpodobnost, že vlákna mají tažnost mezi a a $a+da$. Podobně hustota pravděpodobnosti $f(\sigma)$ je definována tak, že $f(\sigma)d\sigma$ reprezentuje pravděpodobnost, kdy vlákna mají pevnost mezi σ a $\sigma+d\sigma$.

Pravděpodobnost $P(a, \sigma)$, že vlákna mají tažnost mezi a a $a+da$ a pevnost mezi σ a $\sigma+d\sigma$ je dána vztahem (pokud jsou a a σ nezávislé):

$$P(a, \sigma) = \varphi(a)da \cdot f(\sigma)d\sigma \quad (5)$$

Pokud N je celkový počet vláken ve svazku, počet vláken s tažností mezi a a $a+da$ a pevností mezi σ a $\sigma+d\sigma$ je

$$N \cdot \varphi(a)da \cdot f(\sigma)d\sigma \quad (6)$$

Protože $\varphi(a)$ a $f(\sigma)$ jsou normalizované funkce, střední hodnota pevnosti vláken $\bar{\sigma}$ je dána pomocí

$$\bar{\sigma} = \int_0^{\infty} \sigma \cdot f(\sigma) d\sigma \quad (7)$$

Celkové zatížení $P(\varepsilon)$ přenášené všemi vlákny ve svazku můžeme vyjádřit

$$P(\varepsilon) = N \cdot \bar{\sigma} \cdot \varepsilon \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{\varphi(a)}{a} da, \quad (8)$$

kde ε je protažení vláken.

Pozměněním rovnice (8) vzhledem k ε a $dP/d\varepsilon = 0$ dostaneme

$$\int_{a^*}^{\infty} \frac{\varphi(a)}{a} da, \quad (9)$$

kde a^* je protažení svazku při maximálním zatížení, tj. tažnost svazku. Kombinací rovnic (8) a (9) je získána **svazková pevnost $P(a^*)$** jako

$$P(a^*) = N \cdot \bar{\sigma} \cdot a^* \cdot \varphi(a^*), \quad (10)$$

kde je N počet vláken ve svazku, $\bar{\sigma}$ střední hodnota pevnosti vláken, a^* tažnost svazku, $\varphi(a^*)$ hustota pravděpodobnosti rozložení tažnosti svazku, tj. v místě maximálního protažení.

4.1.2 Distribuce pevností svazků vláken

Pro zjednodušení může být uvažován svazek geometricky stejných paralelních vláken uspořádaných rovnoběžně, bez vzájemného ovlivnění [14]. Pokud by tato vlákna byla stejná i mechanicky a praskla všechna najednou, bylo by napětí svazku při přetrhu stejné jako napětí libovolného vlákna. Absolutní síla by byla pro svazek s N vlákny právě N -krát větší. Pokud má každé vlákno jiné napětí σ_i při přetrhu dochází k postupnému praskání od nejslabších vláken. Ve zbylých vláknech se pak musí přenést větší napětí. Je výhodné použít setříděných hodnot napětí $\sigma_{(i)} (= \sigma_{(i+1)})$ označovaných

jako pořádkové statistiky. Z elementárních úvah lze odvodit, že hodnota $\sigma_{(i)}$ je hrubý odhad kvantilové funkce pevnosti vláken $Q(P_i) = F^{-1}(P_i)$ pro pravděpodobnost

$$P_i = \frac{i}{N+1} \quad (11)$$

Při hodnotách napětí $\sigma_{(i)} < \sigma_{(i+1)}$ je celkem i vláken prasklých a $N-i$ vláken ještě může přenášet napětí. Při stejných příčných řezech vláken je celková plocha vláken přenášejících zatížení přímo úměrné počtu neprasklých (přežilých). Maximální síla f_i odpovídající napětí $\sigma_{(i)}$ je pak $(N-i+1) \cdot \sigma_{(i)}$. Pro maximální pevnost svazku pak platí nerovnost

$$(N-j+1) \cdot \sigma_{(j)} \geq (N-j) \cdot \sigma_{(j+1)} \quad (12)$$

Peirce [14] zkoumal pět různých modelů pevnosti vláken v závislosti na podmínkách porušení. Výše uvedeným předpokladům odpovídá model stejného přenášení napětí. Maximální zatížení svazku $P=f_i$ nastane, když z celkového počtu vláken jich prasklo právě M . Označme hustou pravděpodobnosti rozložení pevnosti vláken jako $f(\sigma)$ a odpovídající distribuční funkci jako $F(\sigma)$. Pro velké svazky vláken (velká N) pak obecně platí, že

$$\frac{N-M}{N} = 1 - F(z) \quad \frac{P}{N} = z[1 - F(z)] \quad z = [1 - F(\sigma)]/f(\sigma) \quad (13)$$

Střední hodnota pevnosti svazku je rovna

$$E(\sigma_B) = N \cdot z \cdot [1 - F(\sigma)] \quad (14)$$

a pro směrodatnou odchylku platí

$$SD(\sigma_B) = z \sqrt{F(z) \cdot n \cdot [1 - F(z)]} \quad (15)$$

Zde z je hodnota maximalizující výraz $\sigma[1 - cdf(\sigma)]$. Pro Weibullovo rozdělení pevnosti vláken (s parametrem měřítka B a tvaru C) pak pro proměnou z vyjde

$$z = BC^{-(1/C)} \quad (16)$$

Daniels [14] vyšel ze stejných předpokladů a dokázal, že pro velká N je rozdělení pevností svazku vláken normální bez ohledu na rozdělení pevnosti jednotlivých vláken. Pro Weibullovo rozdělení jednotlivých vláken a limitní normální rozdělení svazku vláken vyjde **střední hodnota pevnosti svazku vláken** rovna

$$E(\sigma_B) = BC^{-1/C} \exp(-1/C), \quad (17)$$

kde B, C jsou parametry odpovídající vláknům.

4.2 Využití substanční pevnosti a tažnosti

Z obecné hodnoty poměrného prodloužení ε a střední hodnoty tažnosti vláken \bar{a} byla vytvořena **pomocná veličina** t [15].

$$t = \frac{\varepsilon}{\bar{a}} \quad (\varepsilon = \bar{a}t) \quad (18)$$

$$dt = \frac{d\varepsilon}{\bar{a}} \quad (d\varepsilon = \bar{a}dt) \quad (19)$$

Potom střední pracovní křivka má tvar :

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) = \bar{P} \cdot \xi\left(\frac{\varepsilon}{\bar{a}}\right) = \bar{P} \cdot \xi(t), \quad (20)$$

kde $\xi(t)$ je vhodná rostoucí funkce proměnné t splňující podmínky:

$$\xi(0)=0 \quad \text{a} \quad \xi(1)=1,$$

protože "vzorová" tahová křivka prochází bodem střední tažnosti \bar{a} a střední pevnosti \bar{P} vláken; $\bar{P} = \bar{\sigma}(\bar{a})$.

Nyní bude zavedeno **využití substanční tažnosti** η_a , vyjadřující využití střední tažnosti vláken v tažnosti vlákenného svazku.

$$\eta_a = \frac{a^*}{\bar{a}} \quad (21)$$

kde a^* je tažnost vlákenného svazku, \bar{a} je střední tažnost vláken.

Dále bude zavedeno **využití substanční pevnosti** η_p , určené vztahem:

$$\eta_p = \frac{P^*}{\bar{P}} \quad (22)$$

kde P^* je pevnost vlákenného svazku a \bar{P} je střední pevnost vláken. Tato veličina tedy charakterizuje míru využití střední pevnosti vláken v pevnosti svazku.

4.3 Model pevnosti a tažnosti předpokládající normální rozložení

Jestliže vlákna mají lineární tahové pracovní křivky, je "vzorová" tahová pracovní křivka lineární s tvarem [15]:

$$\bar{\sigma}(\varepsilon) = \bar{P} \xi\left(\frac{\varepsilon}{\bar{a}}\right) = \bar{P} \xi(t) = \bar{P} \frac{\varepsilon}{\bar{a}} = \bar{P} t \quad (23)$$

Odtud vyplývá, že funkce:

$$\xi(t) = t \quad (\xi(\eta_a) = \eta_a) \quad (24)$$

a její derivace je:

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = 1 \quad \left(\frac{d\xi(\eta_a)}{d\eta_a} = 1 \right) \quad (25)$$

V případě, že rozložení pevnosti a tažnosti vláken lze přibližně popsat **dvourozměrným Gaussovým normálním rozložením**. Kde hustota pravděpodobnosti marginálního rozložení tažností $g(a)$ popisuje jednorozměrné Gaussovo normální rozložení se střední hodnotou \bar{a} a směrodatnou odchylkou s_a .

$$g(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_a} \exp \left[-\frac{(a - \bar{a})^2}{2s_a^2} \right] \quad a \in (-\infty, +\infty) \quad (26)$$

Náhodná proměnná z má po úpravách [15] hustotu pravděpodobnosti:

$$h(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} v_a} \exp \left[-\frac{(z - 1)^2}{2v_a^2} \right] \quad z \in (-\infty, +\infty) \quad (27)$$

Hustota pravděpodobnosti $h(z)$ obsahuje jediný parametr, a to variační koeficient tažnosti vláken v_a . Tento parametr obsahuje přirozeně i distribuční funkce $H(z)$:

$$H(z) = \int_{z_{\min}}^z h(z) dz = \int_{-\infty}^z h(z) dz \quad (28)$$

Potom platí výraz :

$$\frac{d\xi(\eta_a)/d\eta_a}{\xi_a} \frac{1 - H(\eta_a)}{h(\eta_a)} = \frac{1}{\eta_a} \frac{1 - H(\eta_a)}{h(\eta_a)} = 1, \quad (29)$$

kde funkce h a H jsou dány rovnicemi (27), (28).

Rovnice (29) má jediný kořen η_a . Jeho hodnota závisí jen na v_a obsaženém ve funkcích h a H .

Využití substanční tažnosti vláken η_a ve svazku závisí jen na variačním koeficientu tažnosti jednotlivých vláken v_a .

Úpravami [1] byly nalezeny rovnice:

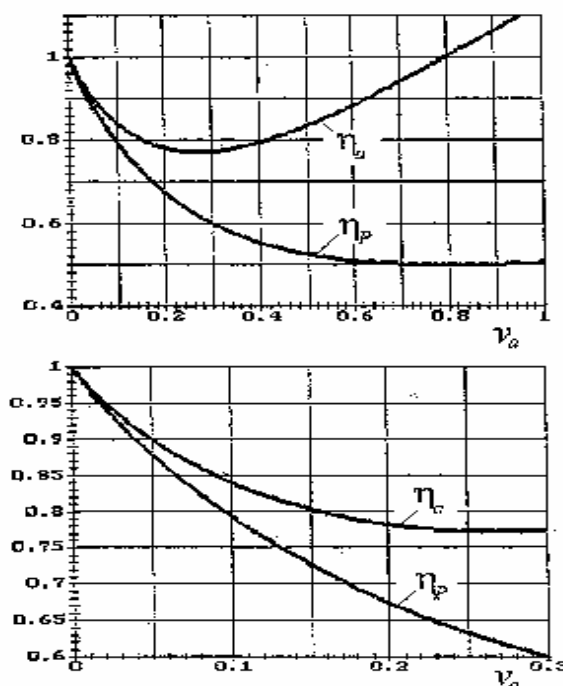
$$\frac{1}{u_a v_a + 1} \frac{1 - G_N(u_a)}{\frac{1}{v_a} g_N(u_a)} = 1 \quad (30)$$

$$\frac{v_a}{u_a v_a + 1} \frac{1 - G_N(u_a)}{g_N(u_a)} = 1 \quad (31)$$

které obsahují hustotu pravděpodobnosti a distribuční funkci normovaného normálního rozdělení, parametr v_a a hledaný kořen u_a . Z něj lze pak vyjádřit **využití substanční tažnosti** η_a pomocí $\eta_a = u_a v_a + 1$.

Výpočet **využití substanční pevnosti** η_P lze vyjádřit ve tvaru :

$$\eta_P = \xi(\eta_a)[1 - H(\eta_a)] = \eta_a[1 - H(\eta_a)] = (u_a v_a + 1)[1 - G_N(u_a)] \quad (32)$$



Obr. 9. Závislost využití substanční pevnosti a tažnosti na variačním koeficientu jednotlivých vláken

Na základě výpočtu kořene u_a a hodnot η_a a η_P pro různé hodnoty variačního koeficientu v_a tažnosti vláken vznikly grafy na obr.8.. Horní graf znázorňuje průběh využití substanční pevnosti a tažnosti v extrémně velkém rozsahu v_a . Využití substanční tažnosti η_a dosahuje kolem hodnoty $v_a = 0,28$ svého minima a poté opět roste. Spodní graf zobrazuje tutéž závislost v prakticky obvyklé oblasti variačního koeficientu tažnosti ($v_a \in (0;0,3)$), tj. od 0 do 30%. Zejména hodnoty využití pevnosti ukazují, že reálný "úbytek" pevnosti v důsledku variace tažnosti vláken může být značně velký.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato práce je zaměřena na zjištění využití pevnosti čedičových vláken ve svazku. Bylo porovnáváno naměřené využití pevnosti vláken ve svazku s hodnotami vypočtenými. Rovněž byla modelována závislost využití pevnosti vláken ve svazku na upínací délce materiálu. Byly také modelovány závislosti pevnosti a tažnosti na jednotlivých upínacích délkách materiálu. Experiment byl proveden na jednotlivých vláknech a svazcích vláken s lubrikací a bez lubrikace.

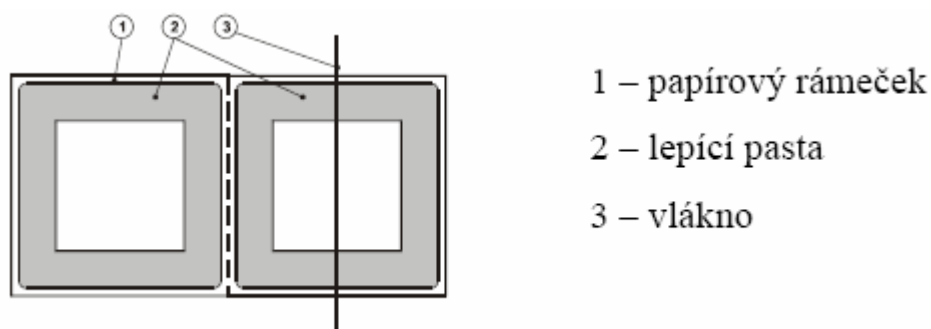
K charakterizaci pevnosti byla zvolena zkouška měření pevnosti v tahu a tažnosti.

5.1 Charakteristika materiálu

Měření byla provedena na svazcích čedičových vláken firmy Kamenný Věk o jemnostech 126 a 80tex. Průměrná jemnost jednotlivých vláken je 0,35tex. Výrobce udávaný lubrikant je Silane.

5.2 Příprava vzorků

Čedičová vlákna byla zbavena lubrikace máčením v acetonu po dobu 15 minut. Poté byla sušena při běžné teplotě cca 20°C. Pro každou upínací délku 10mm, 20mm, 25mm, 50mm a 100mm bylo připraveno 50 vzorků. A to tak, že vlákna byla ze svazků vláken náhodně vybrána. Na papírový rámeček byla nanесena lepicí pasta. Vláknо bylo přilepeno a vytvrzeno po dobu 24h. Schematické zobrazení přípravy vzorku lze vidět na obr.10

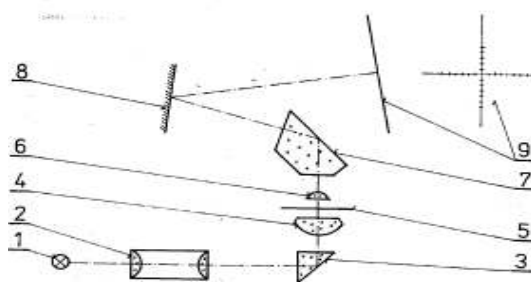


Obr. 10 Schematické zobrazení přípravy vzorků

Stejný postup byl použit i u přípravy svazků vláken, nalepeny byly na papírovou podložku epoxidovou pryskyřicí podobně jako jednotlivá vlákna. Tvrdnutí probíhalo po dobu 24 hodin při normální teplotě. Vzorky byly připraveny na délkách 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400 a 500mm

5.3 Zjišťování průměru vláken

Pro zjištění napětí potřebného pro přetržení vlákna je třeba znát průměr jednotlivých vláken. Do výsledku se tak nezanáší příliš velká chyba měření. V této práci byla použita mikroskopická metoda stanovení tloušťky vláken. Na podložní sklíčko vložené do projekčního mikroskopu Lanametr byl položen papírový čtvereček s vláknem. Obraz preparátu na tomto mikroskopu byl promítán na matnici, opatřenou otočnou pravoúhlou škálou. Na škále byly odečítány dílky, jejichž velikost byla zkalibrována na skutečnou velikost vláken v preparátu pomocí mikrometrického měřítka[2]. V tomto případě bylo měřeno při objektivu 20, kde jeden dílek se rovná dvěma mikrometrům. Schéma měření je zobrazeno na obr. 11



Obr. 11 Schéma Lanametru a měření

kde

1	zdroj světla	6	objektiv
2	kolektor	7	hranol
3	hranol	8	zrcadlo
4	kondenzor	9	matnice
5	preparát		

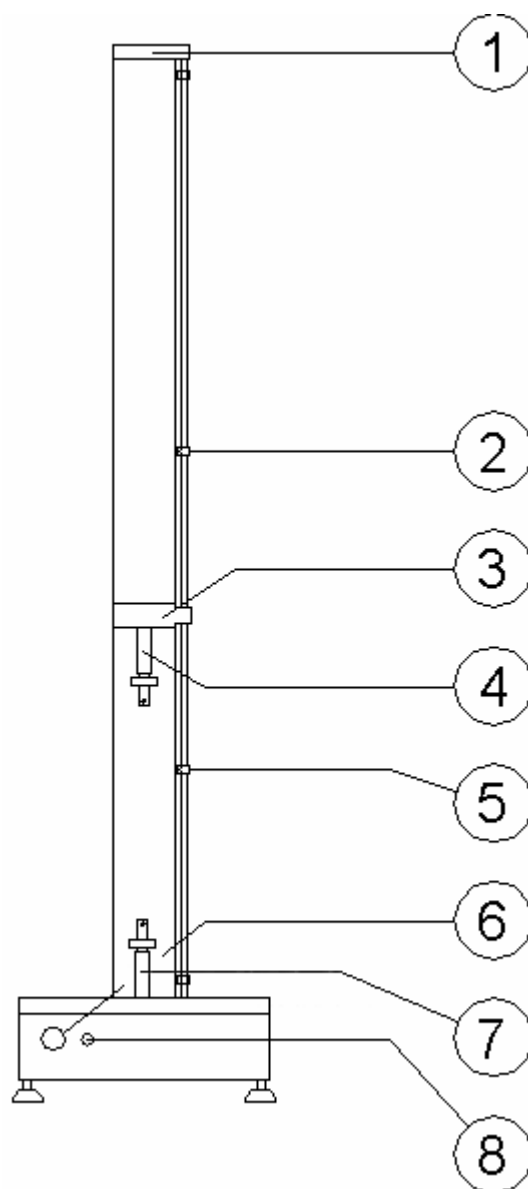
5.4 Měření pevnosti v tahu a tažnosti

LabTest V.2.5 je stolní univerzální zkušební stroj, určený pro mechanickou zkoušku v tahu, tlaku či ohybu nejen u vzorků, ale i celých výrobků.

Technická data

Typ měřicího přístroje:	LabTest V.2.010	
Metoda měření:	Mechanická zkouška v tahu	
Vstupní hodnoty:	Profil vzorku	kulatina
	Upínací délka	10 - 500 mm
	Rychlost posuvu příčnicku	10 mm/min
	Rychlost návratu čelistí	100 mm/min
	Předpětí	bez předpětí
Výstupní hodnoty:	Fmax	maximální dosažená síla
	Amax	tažnost při Fmax
	t	celkový čas zkoušky
Klimatické podmínky:	Teplota pracovního prostředí 10 – 35 °C	
	Vlhkost pracovního prostředí 20 – 70 %	

Při zjišťování pevnosti v tahu se anorganická vlákna nemohou upevňovat přímo do čelistí trhačky. Jsou křehká a sevřením čelistí se drtí, proto se vlákna přilepují na papírový rámeček. Ten je uchycen do speciálních čelistí přístroje a přestřižen tak, aby bylo uchyceno pouze vlákno nebo svazek vláken. Poté probíhá měření dle [16]. Výsledné hodnoty pevnosti a tažnosti vláken jsou uvedeny v tabulkách a grafech. Při trhání byly zachovány standardní klimatické podmínky tj. teplota $\bar{T} = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, vlhkost vzduchu $\bar{\varphi} = 65 \pm 5\%$. V těchto podmínkách byly vzorky také skladovány.



Obr. 12 LabTest V.2.5

Legenda:

- 1 – rám
- 2 – horní doraz
- 3 – posuvný příčník
- 4 – horní čelist
- 5 – ovládání
- 6 – dolní doraz
- 7 – dolní čelist
- 8 – světelná kontrolka zapnutí stroje
- 9 – hlavní vypínač

6. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT

Pro stanovení průměru pevnosti a tažnosti vláken bylo provedeno 50 měření pro každou upínací délku vláken 10, 20, 25, 50 a 100mm a všechny upínací délky svazků vláken 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400 a 500mm.

Statistická analýza byla provedena pomocí statistického software QC.Expert v. 2.5. Všechna naměřená data jsou uvedena v příloze A na CD. Bylo nutné výsledná data nejdříve statisticky zpracovat. Výběry byly vyhodnoceny bez vybočujících hodnot. Základní statistické charakteristiky všech naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze B na CD. Toto CD obsahuje také grafy základní statistické analýzy tj. histogram, odhad hustoty pravděpodobnosti, Q-Q graf atd.. Takto byly vyhodnoceny všechny jednotlivé výběry. Absolutní pevnost [N] bylo nutné pro další použití přepočítat na relativní měrnou pevnost [N/tex] podle rovnice (34).

Přehled použitých vzorců

$$T = \frac{\pi}{4} * d^2 * \rho * 10^6 \quad (33)$$

$$F_r = \frac{F}{T} = \frac{F}{S * \rho} \quad (34)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (35)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (36)$$

kde

σ - napětí při přetrhu [Pa]

F_{\max} - maximální síla [N]

S - plocha průřezu vlákna [m²]

d - průměr vlákna [m]

ε - poměrná deformace [1]

l - změna délky vlákna při namáhání v tahu [m]

l_0 - počáteční délka vlákna [m]

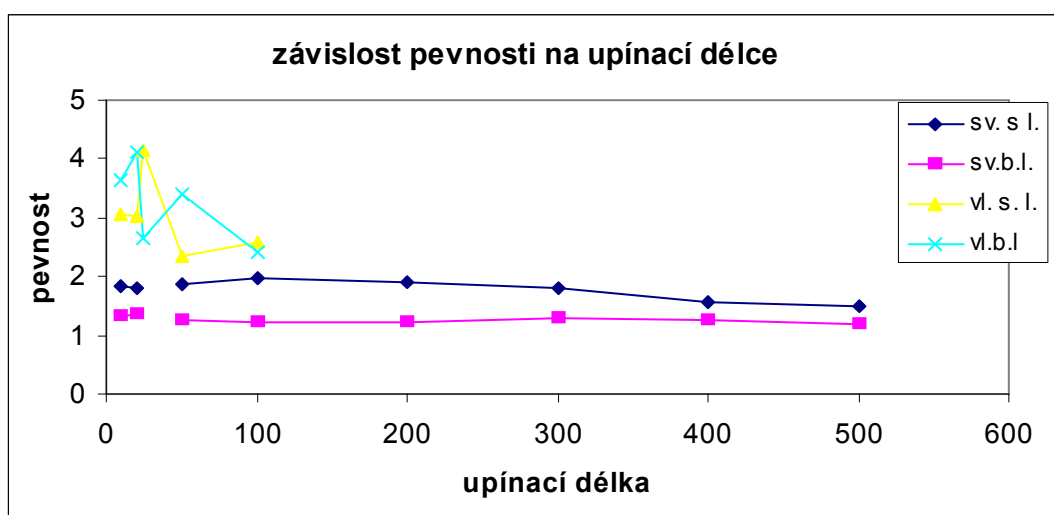
ρ - měrná hmotnost [kg.m⁻³]

6.1 Základní statistika

Průměrné hodnoty relativní měrné pevnosti, tažnosti a vypočteného modulu pružnosti a závislosti těchto veličin na upínací délce vzorků jsou uvedené v následujících tabulkách a grafech.

Tab. 4 Průměrné hodnoty pevnosti pro jednotlivé soubory

Průměrná pevnost svazků [GPa]			
Svazky	l_0 [mm]	Svazky s lubrikací	Svazky bez lubrikace
	10	1,826	1,331
	20	1,810	1,36
	50	1,870	1,271
	100	1,970	1,218
	200	1,911	1,233
	300	1,794	1,277
	400	1,577	1,248
	500	1,485	1,182
Průměrná pevnost vláken [GPa]			
Vláken	l_0 [mm]	Vláken s lubrikací	Vláken bez lubrikace
	10	3,059	3,623
	20	3,017	4,116
	25	4,152	2,667
	50	2,345	3,415
	100	2,577	2,430

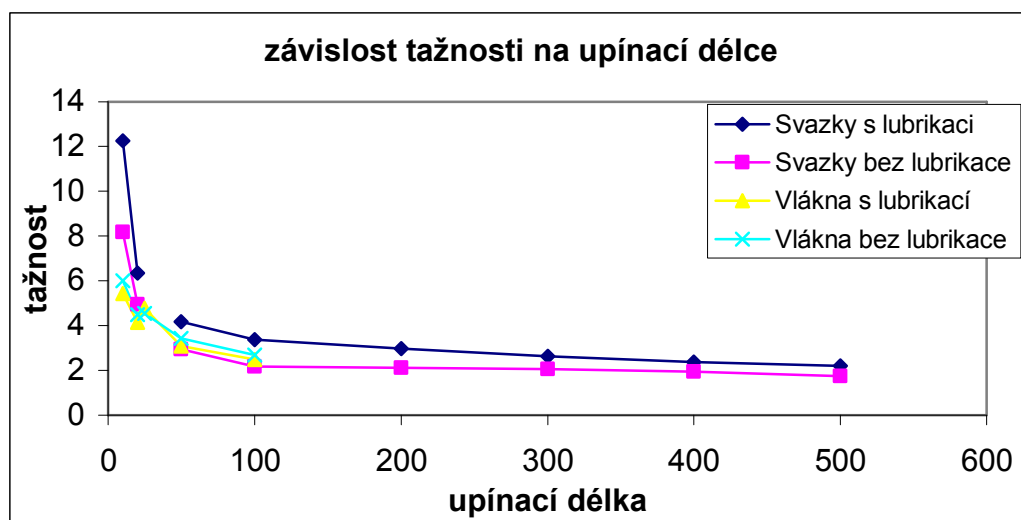


Obr. 13 Závislost měrné pevnosti [GPa] čedičových vláken a svazků vláken na upínací délce [mm]

Na obrázku číslo 13 lze vidět zřetelný pokles svazkové pevnosti v porovnání s pevností jednotlivých vláken. Podle Weibullový teorie pevnosti [11] má pevnost v závislosti na upínací délce typický tvar klesající křivky. Zde toto není tak jednoznačné, protože u přírodního materiálu jako je čedič nelze zcela docílit stejnoměrné pevnosti po celé délce vlákna. Na obrázku také můžeme vidět jasný rozdíl mezi pevností svazků vláken s lubrikací a bez lubrikace.

Tab. 5 Průměrné hodnoty tažnosti pro jednotlivé soubory

Průměrná tažnost svazků [%]			
Svazky	l_o [mm]	Svazky s lubrikací	Svazky bez lubrikace
	10	12,25	8,18
	20	6,33	4,94
	50	4,17	2,93
	100	3,38	2,18
	200	2,96	2,12
	300	2,63	2,05
	400	2,37	1,95
	500	2,21	1,74
Průměrná tažnost vláken [%]			
Vlákna	l_o [mm]	Vlákna s lubrikací	Vlákna bez lubrikace
	10	5,43	6,00
	20	4,14	4,49
	25	4,77	4,54
	50	3,10	3,44
	100	2,49	2,69

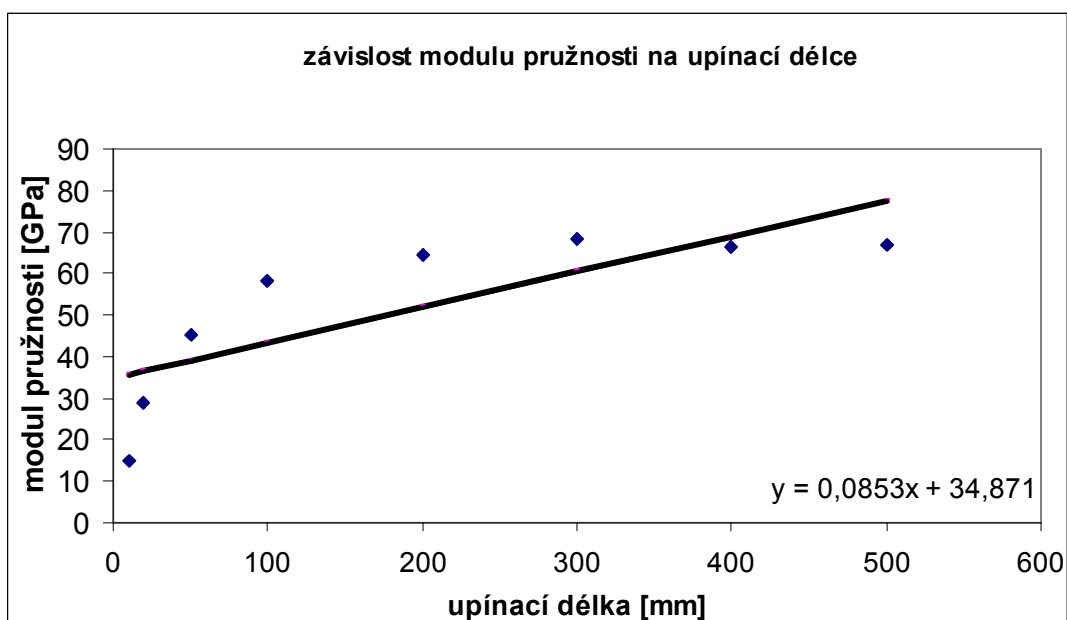


Obr. 14 závislost tažnosti [%] čedičových vláken a svazků vláken na upínací délce[mm]

Na obr. 14 lze vidět, že tažnost čedičových vláken je téměř zanedbatelná, pohybuje se v rozmezí 1 - 6%, pouze u kratších upínacích délek (10, 20 a 25mm) je tažnost vyšší. Dosahuje až 12 %.

Tab. 6 Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé soubory

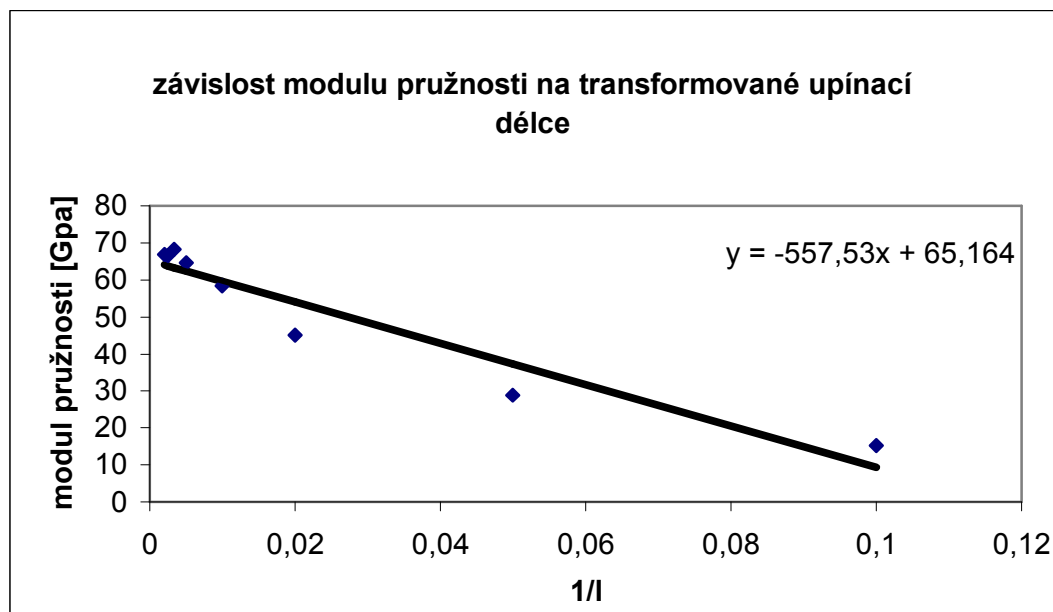
Modul pružnosti svazků [GPa]			
Svazky	l_0 [mm]	Svazky s lubrikací	Svazky bez lubrikace
	10	14,77	16,39
	20	28,84	27,58
	50	45,17	43,52
	100	58,48	56,01
	200	64,64	58,13
	300	68,22	62,31
	400	66,49	64,17
	500	66,94	67,93
Modul pružnosti vláken [GPa]			
Vlákná	l_0 [mm]	Vlákná s lubrikací	Vlákná bez lubrikace
	10	56,96	62,00
	20	72,47	92,77
	25	87,55	59,12
	50	75,58	99,25
	100	102,75	90,71



Obr. 15 Závislost modulu pružnosti svazků vláken s lubrikací na upínací délce

Tvar regresní křivky nám ukazuje, že hodnoty modulu pružnosti se v závislosti na zvyšující se upínací délce zvyšují. Velký rozdíl na krátkých upínacích délkách (10 a 20mm) je způsoben upnutím vzorku v čelistech, sevření čelistí vždy ovlivňuje mechanické vlastnosti vzorku v jejich bezprostřední blízkosti. Na kratších upínacích délkách toto ovlivňuje celkový výsledek.

Abychom se tomuto vlivu vyhnuli, byla zkoumána závislost modulu pružnosti na transformované upínací délce ($1/l_0$), tím byl získán zdánlivý modul pružnosti. Totéž bylo provedeno i u svazků vláken bez lubrikace.



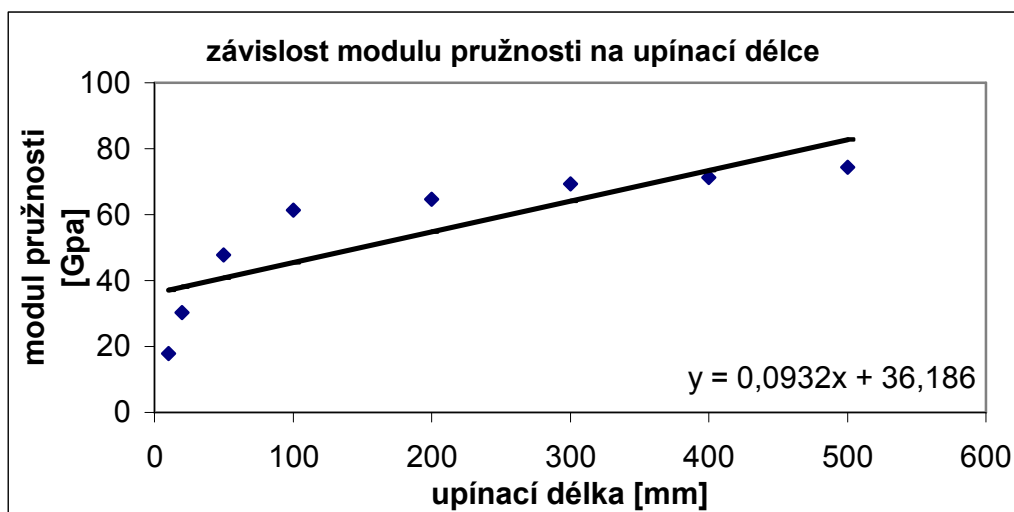
Obr.16 Závislost modulu pružnosti svazků vláken s lubrikací na transformované upínací délce

Tab. 7 Tabulka výsledků regresní analýzy

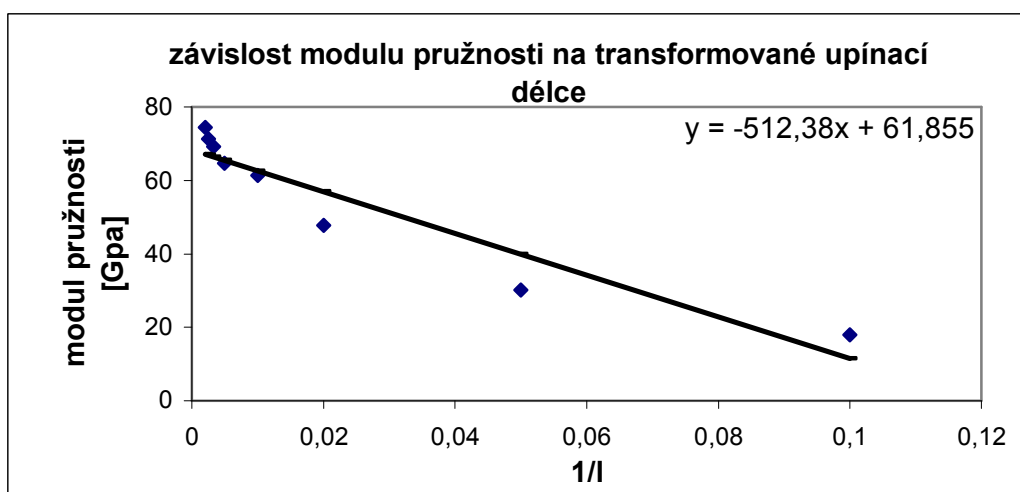
Odhad	Korelační koeficient	Směr.Odch	Spodní mez	Horní mez
65,1637	0,9587	2,7261	58,4932	71,8343

Jak nám ukazuje hodnota vícenásobného korelačního koeficientu $R=0,96$ data jsou na sobě závislá.

Zdánlivý modul pružnosti pro nekonečně dlouhý svazek vláken s lubrikací je 65,16 GPa



Obr. 17 Závislost modulu pružnosti odlubrikovaných svazků vláken na upínací délce



Obr. 18 Závislost modulu pružnosti odlubrikovaných svazků vláken na transformované upínací délce

Tab. 8 Tabulka výsledků regresní analýzy

Odhad	Korelační koeficient	Směr.Odch	Spodní mez	Horní mez
61,8554	0,9489	2,8075	54,9857	68,7251

U odlubrikovaných svazků vláken modul pružnosti také stoupá se zvýšením upínací délky. Zdánlivý modul pružnosti, tedy modul pružnosti pro nekonečně dlouhé svazky je u odlubrikovaných svazků vláken 61,86 GPa. Podle korelačního koeficientu $R=0,95$ jsou na sobě data závislá.

6.2 Stanovení pravděpodobnostního modelu

Optimální rozdělení pevností a tažností zkoumaných vláken bylo stanoveno ve statistickém programu QC.Expert. Jako optimální rozdělení bylo nejčastěji stanoveno Weibullovo rozdělení.

V následujících tabulkách budou uvedena optimální rozdělení pevností σ a tažností ε vláken spolu s korelačním koeficientem optimálního rozdělení r a korelačním koeficientem Weibullova rozdělení r_w pro všechny soubory dat. Kompletní výsledky a grafy rozložení pevnosti jsou v příloze C na CD.

Tab. 9 Stanovená optimální rozdělení pevností svazků s lubrikací

Vzorek	Optimální rozdělení	r	r_w
10mm	Normální	0,9905	-
20mm	Lognormální	0,993	0,992
50mm	Normální	0,9936	-
100mm	Weibullovo	0,9805	
200mm	Weibullovo	0,9861	
300mm	Weibullovo	0,9912	
400mm	Normální	0,9913	-
500mm	Weibullovo	0,9945	

Tab. 10 Stanovená optimální rozdělení pevností svazků bez lubrikace

Vzorek	Optimální rozdělení	r	r_w
10mm	Rovnoměrné	0,984	-
20mm	Normální	0,989	-
50mm	Normální	0,979	
100mm	Lognormální	0,996	0,993
200mm	Weibullovo	0,990	
300mm	Weibullovo	0,992	
400mm	Rovnoměrné	0,987	-
500mm	Weibullovo	0,988	

Tab. 11 Stanovená optimální rozdělení vláken s lubrikací

Vzorek	Optimální rozdělení	r	r _w
10mm	Weibullovo	0,996	
20mm	Lognormální	0,992	0,991
25mm	Weibullovo	0,989	
50mm	Lognormální	0,968	0,959
100mm	Lognormální	0,985	0,980

Tab. 12 Stanovená optimální rozdělení vláken bez lubrikace

Vzorek	Optimální rozdělení	r	r _w
10mm	Normální	0,979	0,976
20mm	Weibullovo	0,993	
25mm	Lognormální	0,989	0,986
50mm	Weibullovo	0,993	
100mm	Weibullovo	0,993	

6.3 Gaussovský model pevnosti a tažnosti vláken

Naměřené hodnoty využití pevnosti vláken ve svazku η_P byly nejdříve porovnány s modelem pevnosti a tažnosti předpokládajícím normální (Gaussovo) rozložení viz.kap. 4.3. Teoretické hodnoty využití pevnosti η_{PT} byly odečteny z grafu na obr. 9 podle variačního koeficientu pevnosti vláken. Relativní odchylka měření byla vypočtena podle rovnice:

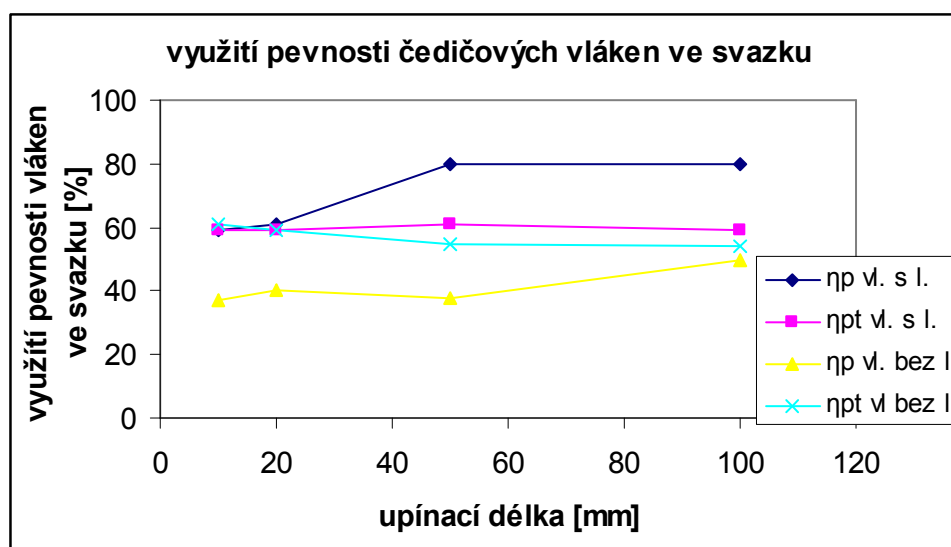
$$R = \frac{\eta_P - \eta_{PT}}{\eta_{PT}} * 100 [\%] \quad (37)$$

Tab. 13 Porovnání využití pevnosti vláken s lubrikací ve svazku s Gaussovským modelem

	lo=10mm	lo=20mm	lo=50mm	lo=100mm
v_a vláken [-]	0,34	0,33	0,29	0,33
η_P [%] naměřené	59	61	80	80
η_{PT} [%] teoretické	59	59	61	59
relativní odchylka R	0%	3%	31%	36%

Tab.14 Porovnání využití pevnosti vláken bez lubrikace ve svazku s Gaussovským modelem

	$l_0=10\text{mm}$	$l_0=20\text{mm}$	$l_0=50\text{mm}$	$l_0=100\text{mm}$
v_a vláken [-]	0,29	0,33	0,39	0,41
η_p [%] naměřené	37	40	38	50
η_{pT} [%] teoretické	61	59	55	54
relativní odchylka R	-30%	-32%	31%	8%

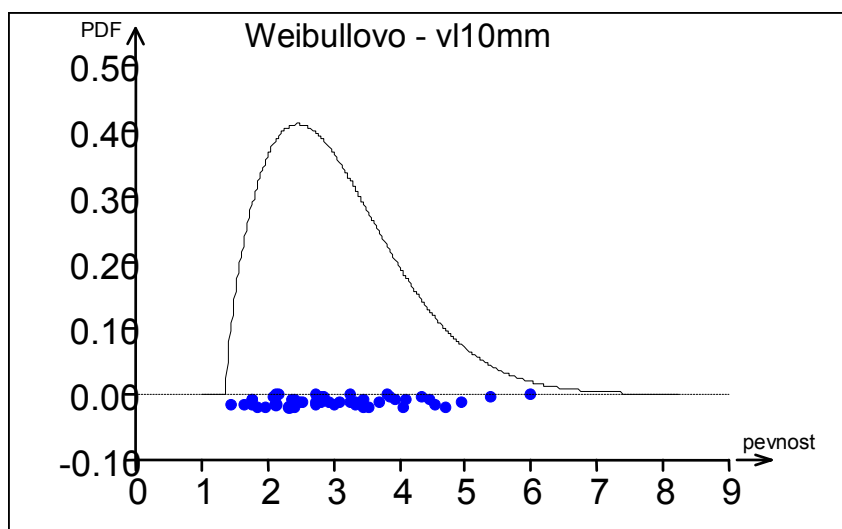


Obr. 19 Závislost využití pevnosti na upínací délce

Z obrázku 19 je patrné, že podle gaussovského modelu jsou teoretické hodnoty využití pevnosti téměř stejné u svazků s lubrikací i bez lubrikace. Naměřené hodnoty pro svazky bez lubrikace jsou oproti teoretickým výpočtům nižší. Naopak pro svazky s lubrikací jsou naměřené hodnoty vyšší než vypočtené.

6.4 Model s Weibullovou distribucí pevnosti vláken

Svazková pevnost byla vypočítána podle rovnice (17). Rozdělení pro jednotlivá vlákna i pro svazky byla stanovena pomocí statistického software QC.Expert. Výpočet je uveden pro jednu upínací délku $l_0=10\text{mm}$ viz. tab.5.. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze D.



Obr. 20 Weibullovo rozložení pevností vláken s parametry : $B = 2068,6 \text{ GPa}$; $C = 1,8569$; $l_0 = 50 \text{ mm}$

Tab.15. Výpočet svazkové pevnosti, $l_0 = 10 \text{ mm}$ (model s Weibullovou distribucí pevnosti vláken)

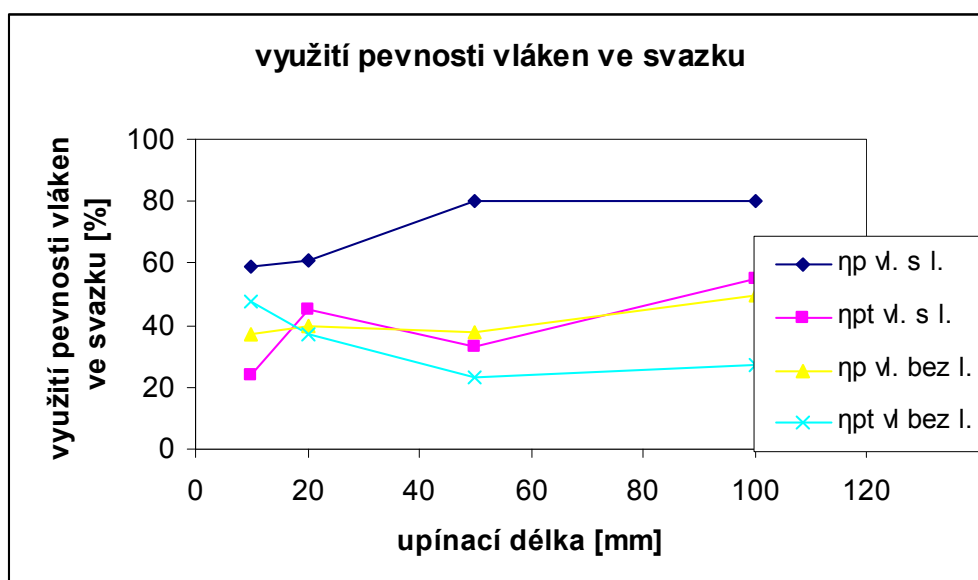
upínací délka $l_0 = 10 \text{ mm}$		měrná hmotnost $\rho = 2660 \text{ kg/m}^3$
vlákna : jemnost		$T = 0,334 \text{ tex}$
pevnost naměřená	$\bar{P} = 0,345 \text{ N}$	$\bar{P} = 3,059 \text{ GPa}$
svazky : jemnost		$T_{\Sigma} = 126 \text{ tex}$
pevnost naměřená	$\bar{P}_{\Sigma} = 86,51 \text{ N}$	$\bar{P}_{\Sigma} = 1,826 \text{ GPa}$
pevnost vypočtená	$\bar{P}_{\Sigma V} = 36,1 \text{ N}$	$\bar{P}_{\Sigma V} = 0,7622 \text{ GPa}$
využití pevnosti vláken ve svazku :		
naměřené $\eta_p = 59 \%$		
vypočtené $\eta_{P_V} = 24 \%$		

Tab. 16 Celkové výsledky výpočtu svazkové pevnosti (model s Weibullovou distribucí pevností vláken)

S lubrikací	lo=10mm	lo=20mm	lo=50mm	lo=100mm
\bar{P}_{Σ} [GPa] naměřená	1,826	1,819	1,871	1,969
$\bar{P}_{\Sigma v}$ [GPa] vypočtená	0,7622	1,3562	0,7676	1,387
Odchylka měření	146	35	142	45
η_P [%] naměřené	59	61	80	80
η_{Pv} [%] vypočtené	24	45	33	55

Tab. 17. Celkové výsledky výpočtu svazkové pevnosti (model s Weibullovou distribucí pevností vláken)

Bez lubrikace	lo=10mm	lo=20mm	lo=50mm	lo=100mm
\bar{P}_{Σ} [GPa] naměřená	1,331	1,36	1,271	1,218
$\bar{P}_{\Sigma v}$ [GPa] vypočtená	1,714	1,2446	0,7723	0,6499
Odchylka měření	23%	8%	65%	85%
η_P [%] naměřené	37	40	38	50
η_{Pv} [%] vypočtené	48	37	23	27



Obr. 21 Využití pevnosti vláken ve svazku podle Weibullova modelu

Naměřené hodnoty využití pevnosti vláken ve svazku jsou v tomto případě opět vyšší než hodnoty teoretické. Zcela jasně to lze vidět na obrázku 21. Liší se hodnoty vzorků s lubrikací i bez lubrikace.

6.5 Porovnání dvou výběrů

Porovnání dvou výběrů bylo provedeno ke zjištění, zda vlákna s lubrikací a vlákna bez lubrikace mají stejnou nebo rozdílnou pevnost. Stejně porovnání bylo provedeno i pro svazky vláken s lubrikací a svazky bez lubrikace. Porovnání bylo provedeno pomocí statistického software QC.Expert. Výsledky porovnání jsou uvedeny v příloze E. V následujících tabulkách 18 a 19 jsou vyjádřeny výsledky testů shody rozptylů a testů shody průměrů pro dané rozptyly.

Tab. 18 Porovnání pevností vláken s lubrikací a bez lubrikace

Porovnání pevností vláken s lubrikací a bez lubrikace		
Upínací délka	Test shody rozptylů	Test shody průměrů pro dané rozptyly
10 mm	shodné	shodné
20 mm	rozdílné	rozdílné
25 mm	rozdílné	rozdílné
50 mm	rozdílné	rozdílné
100mm	shodné	shodné

Z tabulky č. 18 vyplývá, že většina vláken má podle testu shody rozptylů rozdílné rozptyly. To tedy znamená, že použitá lubrikace ovlivňuje pevnost vláken. Následně byl proveden test shody průměrů, a to pro rozdílné nebo shodné rozptyly. Pouze u délek 10 a 100mm jsou jak rozptyly tak průměry shodné.

Tab. 19 Porovnání pevnosti svazků s lubrikací a bez lubrikace

Porovnání pevností svazků s lubrikací a bez lubrikace		
Upínací délka	Test shody rozptylů	Test shody průměrů pro dané rozptyly
10 mm	rozdílné	rozdílné
20 mm	rozdílné	rozdílné
50 mm	shodné	rozdílné
100 mm	rozdílné	rozdílné
200 mm	rozdílné	rozdílné
300 mm	shodné	rozdílné
400 mm	rozdílné	rozdílné
500 mm	rozdílné	rozdílné

Při porovnání pevností svazků se ukázalo, že svazky s lubrikací a bez lubrikace mají podle testu shody rozptylů na všech délkách rozdílné rozptyly. Pouze na upínacích délkách 50 a 300 mm byly rozptyly shodné. Následný test shody průměrů ukázal, že všechny průměry jsou rozdílné. To znamená, že jak svazky tak jednotlivá vlákna mají díky použité lubrikaci vyšší pevnost než svazky vláken bez lubrikace.

7. ZÁVĚR

V současné době existuje mnoho přístupů, jak řešit svazkovou pevnost. Přesto ji můžeme označit za stále otevřený problém. Většina modelů určuje hodnoty svazkové pevnosti pomocí pevností jednotlivých vláken. Pro modely svazkové pevnosti je také obtížné definovat vhodné výchozí předpoklady, které odpovídají za každé situace realitě. Svazková pevnost se zjišťuje v případě, kdy nelze zjistit pevnost jednotlivých vláken (hlavně u křehkých vláken) a nebo z důvodu snadného získání informací.

Cílem této diplomové práce bylo stanovit využití pevnosti čedičových vláken ve svazku. Podle Weibullový teorie pevnosti má pevnost v závislosti na upínací délce typický tvar klesající křivky. V případě měřených čedičových vláken to není tak jednoznačné, protože u přírodního materiálu jako je čedič nelze docílit stejnoměrné pevnosti po celé délce vlákna.

Naměřené hodnoty využití pevnosti vláken ve svazku η_p byly nejdříve porovnány s modelem pevnosti a tažnosti předpokládajícím normální (Gaussovo) rozložení. Bylo zjištěno, že naměřené využití pevnosti vláken ve svazku vláken s lubrikací je 60% u délek 10 a 20mm a 80% u délek 50 a 100mm. Teoretické hodnoty pro tyto délky jsou 59%. U odlubrikovaných vláken se hodnota využití pevnosti pohybuje od 37 do 50%.

Při porovnání s teoretickými modely se prokázalo, že v případě svazků s lubrikací je naměřené využití vyšší než teoretické, jehož hodnoty pro dané upínací délky jsou 59 – 61%. U svazků bez lubrikace jsou teoretické hodnoty vyšší než vypočtené, pohybují se v rozmezí 54 až 61%

Následně bylo provedeno porovnání naměřených hodnot využití pevnosti s Weibullovým modelem. Teoretické hodnoty využití pevnosti získané pomocí tohoto modelu jsou jak v případě svazků s lubrikací tak bez lubrikace nižší než naměřené. U svazků s lubrikací se hodnoty využití pevnosti pohybují v rozmezí 24 – 55%, u svazků bez lubrikace v rozmezí 23 – 48%.

Optimální rozdělení pevností a tažností zkoumaných vláken bylo stanoveno pomocí statistického software QC.Expert. Jako optimální rozdělení bylo nejčastěji stanoveno Weibullovo rozdělení.

Tažnost čedičových vláken je celkem zanedbatelná, jelikož se pohybuje v rozmezí 1 - 6%, pouze u kratších upínacích délek 10, 20 a 25mm je tažnost vyšší, dosahuje až 12 %.

Při porovnání pevností svazků se ukázalo, že svazky s lubrikací a bez lubrikace mají podle testu shody rozptylů na všech délkách rozdílné rozptyly. Pouze na délkách 50 a 300mm byly rozptyly shodné. Následný test shody průměrů ukázal, že všechny průměry jsou rozdílné.

Závislosti pevnosti, tažnosti a využití pevnosti vláken na jednotlivých upínacích délkách byly graficky znázorněny a modelovány lineární regresí. Byly stanoveny korelační koeficienty závislosti veličin.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Jakeš, P.: Zpráva pro Leroy Eclat AG, Tažená bazaltová vlákna, Praha, 2002
- [2] Militký, J.: Přednášky textilní vlákna, speciální vlákna, TUL, Liberec 2005,
- [3] <http://www.basaltex.cz/>
- [4] Svoboda, K.: Tavený čedič ve stokování, MM průmyslové skriptum, 1999, č. 4, str. 42- 43
- [5] Holub, F.: Magmatické horniny – stručný přehled petrologie, Plagioklasy, Prosinec 1997, [cit. 15.4. 2008]
- [6] Jamborová, J.: Pevnost čedičových vláken, Diplomová práce, TU Liberec, 2003
- [7] Militký, J., Kovačič, V., Grégr, J., Gupta, C.: Comparison of two types of basalt continuoust fibres and distribution of basalt filaments ultimate properties
- [8] Kovačič, V.: Textilní zkušebnictví - díl I., TUL, Liberec, 2004
- [9] Militký, J., Kovačič, V.: Ultimate mechanical properties of the basalt filaments, Textile Research Journale, 1996, č. 66 (4), str. 225 – 229
- [10] Turnerová, E.: Svazková pevnost PAD hedvábí, Diplomová práce, TU Liberec 2003
- [11] Milli, R.M.- Bouchaour, T.- Merle, P.: Estimation of Weibull Parameters from Loose-Bundle Test, Composites Science and Technology 56 Ireland, 1996
- [12] Sutherland, L.S.- Soare, C. G.: Review of probabilistic models of the strength of composite materials, Technical University Lisbon Portugal,
- [13] Nachane, R.P.- Krichna Iver, K.R.: Prediction of Bundle Strength From Single-Fibers Test Data. Textile Research Institute, 1980
- [14] Lizák, P.- Militký, J.: Technické textilie. Ružomberok 2002
- [15] Neckář, B.: Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákenných útvarů, TU Liberec, 1998
- [16] ČSN EN ISO 5079, Zjišťování pevnosti a tažnosti jednotlivých vláken při přetrhu, březen 1997
- [16] Neckář, B.: Příze. SNTL Praha, 1990

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Roving

Obr. 2 Čedič

Obr. 3 Augit

Obr. 4 Magnetit

Obr. 5 Olivín

Obr. 6 Plagioklas

Obr. 7 Lom čedičového vlákna

Obr. 8 Modul pružnosti

Obr. 9. Závislost využití substanční pevnosti a tažnosti na variačním koeficientu jednotlivých vláken

Obr. 10 Schematické zobrazení přípravy vzorků

Obr. 11 Schéma Lanametru a měření

Obr. 12 LabTest V.2.5

Obr. 13 Závislost měrné pevnosti čedičových vláken a svazků vláken na upínací délce

Obr. 14 závislost tažnosti čedičových vláken a svazků vláken na upínací délce

Obr. 15 Závislost modulu pružnosti svazků vláken s lubrikací na upínací délce

Obr. 16 Závislost modulu pružnosti svazků vláken s lubrikací na transformované upínací délce

Obr. 17 Závislost modulu pružnosti odlubrikovaných svazků vláken na upínací délce

Obr. 18 Závislost modulu pružnosti odlubrikovaných svazků vláken na transformované upínací délce

Obr. 19 Závislost využití pevnosti na upínací délce

Obr. 20 Weibullové rozložení pevností vláken s parametry : $B = 2068,6 \text{ GPa}$; $C = 1,8569$; $l_0 = 50 \text{ mm}$

Obr. 21 Využití pevnosti vláken ve svazku podle Weibullova modelu

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání fyzikálních vlastností čedičového a skleněného vlákna

Tab. 2 Složení Kamenný věk [hm %]

Tab. 3 Chemický rozbor čedičového vlákna

Tab. 4 Průměrné hodnoty pevnosti pro jednotlivé soubory

Tab. 5 Průměrné hodnoty tažnosti pro jednotlivé soubory

Tab. 6 Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé soubory

Tab. 7 Tabulka výsledků regresní analýzy

Tab. 8 Tabulka výsledků regresní analýzy

Tab. 9 Stanovená optimální rozdělení pevností svazků s lubrikací

Tab. 10 Stanovená optimální rozdělení pevností svazků bez lubrikace

Tab. 11 Stanovená optimální rozdělení vláken s lubrikací

Tab. 12 Stanovená optimální rozdělení vláken bez lubrikace

Tab. 13 Porovnání využití pevnosti vláken s lubrikací ve svazku s Gaussovským modelem

Tab.14 Porovnání využití pevnosti vláken bez lubrikace ve svazku s Gaussovským modelem

Tab.15. Výpočet svazkové pevnosti, $l_0=10\text{mm}$ (model s Weibullovou distribucí pevnosti vláken)

Tab. 16 Celkové výsledky výpočtu svazkové pevnosti (model s Weibullovou distribucí pevností vláken)

Tab. 17 Celkové výsledky výpočtu svazkové pevnosti (model s Weibullovou distribucí pevností vláken)

Tab. 18 Porovnání pevností vláken s lubrikací a bez lubrikace

Tab. 19 Porovnání pevnosti svazků s lubrikací a bez lubrikace

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH:

- A. Naměřené hodnoty z trhačky – na CD
- B. Základní statistika – na CD
- C. Stanovení rozdělení pravděpodobnosti – na CD
- D. Výpočet využití pevnosti vláken ve svazku
- E. Porovnání dvou výběrů

D. Výpočet využití pevnosti vláken ve svazku

Využití pevnosti vláken ve svazku s upínací délkou 10mm

upínací délka lo=10mm		měrná hmotnost ρ=2660 kg/m ³	
vlákna : jemnost	T= 0,334 tex		
pevnost naměřená	$\bar{P} = 0,345 \text{ N}$	$\bar{P} = 3,059 \text{ GPa}$	
svazky : jemnost	T _Σ =126 tex		
pevnost naměřená	$\bar{P}_{\Sigma} = 86,51 \text{ N}$	$\bar{P}_{\Sigma} = 1,826 \text{ GPa}$	
pevnost vypočtená	$\bar{P}_{\Sigma v} = 36,1 \text{ N}$	$\bar{P}_{\Sigma v} = 0,7622$	
GPa			
využití pevnosti vláken ve svazku :			
naměřené $\eta_P = 59 \%$			
vypočtené $\eta_{P_v} = 24 \%$			

Využití pevnosti vláken ve svazku s upínací délkou 20mm

upínací délka lo=20mm		měrná hmotnost ρ=2660 kg/m ³	
vlákna : jemnost	T= 0,334 tex		
pevnost naměřená	\overline{P} = 0,383 N	\overline{P} = 3,017 GPa	
svazky : jemnost	T _Σ =126 tex		
pevnost naměřená	\overline{P}_Σ = 86,2 N	\overline{P}_Σ = 1,819 GPa	
pevnost vypočtená	$\overline{P}_{\Sigma v}$ = 64,24 N	$\overline{P}_{\Sigma v}$ = 1,3562	
GPa			
využití pevnosti vláken ve svazku :			
naměřené η_P = 61 %			
vypočtené η_{P_v} = 45 %			

Využití pevnosti vláken ve svazku s upínací délkou 50mm

upínací délka lo=50mm		měrná hmotnost ρ=2660 kg/m ³	
vlákna : jemnost	T= 0,334 tex		
pevnost naměřená	\overline{P} = 0,366 N	\overline{P} = 2,345 GPa	
svazky : jemnost	T _Σ =80 tex		
pevnost naměřená	\overline{P}_{Σ} = 56,25 N	\overline{P}_{Σ} = 1,871 GPa	
pevnost vypočtená	$\overline{P}_{\Sigma v}$ = 23,09 N	$\overline{P}_{\Sigma v}$ = 0,7676	
GPa			
využití pevnosti vláken ve svazku :			
naměřené η_P =80 %			
vypočtené η_{P_v} =33 %			

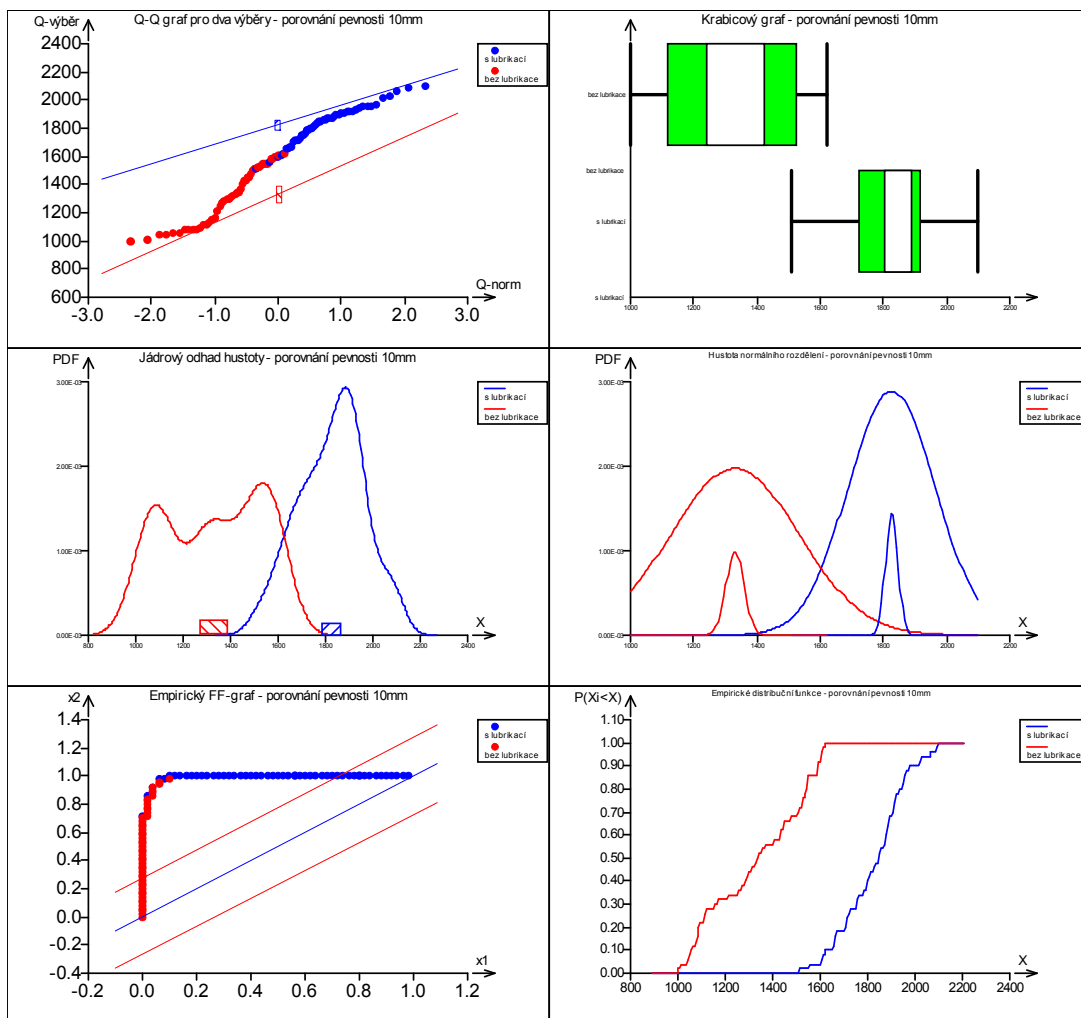
Využití pevnosti vláken ve svazku s upínací délkou 100mm

upínací délka lo=100mm		měrná hmotnost ρ=2660	
kg/m³			
vlákna : jemnost	T= 0,334 tex		
pevnost naměřená	$\overline{P} = 0,311 \text{ N}$	$\overline{P} = 2,527 \text{ GPa}$	
svazky : jemnost	TΣ=80 tex		
pevnost naměřená	$\overline{P}_{\Sigma} = 59,24 \text{ N}$	$\overline{P}_{\Sigma} = 1,969 \text{ GPa}$	
pevnost vypočtená	$\overline{P}_{\Sigma v} = 41,71 \text{ N}$	$\overline{P}_{\Sigma v} = 1,387$	
GPa			
využití pevnosti vláken ve svazku :			
naměřené $\eta_P = 80 \%$			
vypočtené $\eta_{P_v} = 55 \%$			

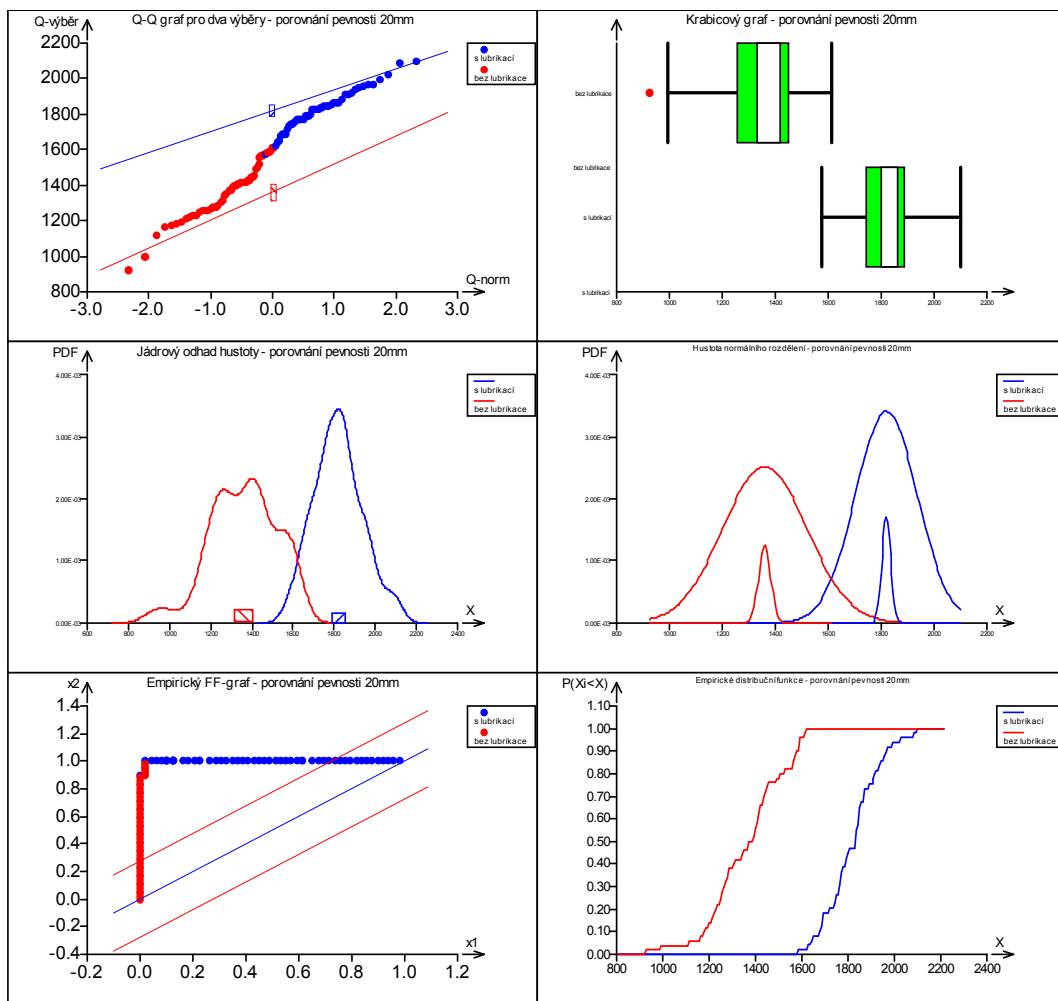
E. Porovnání dvou výběrů

Porovnání dvou výběrů

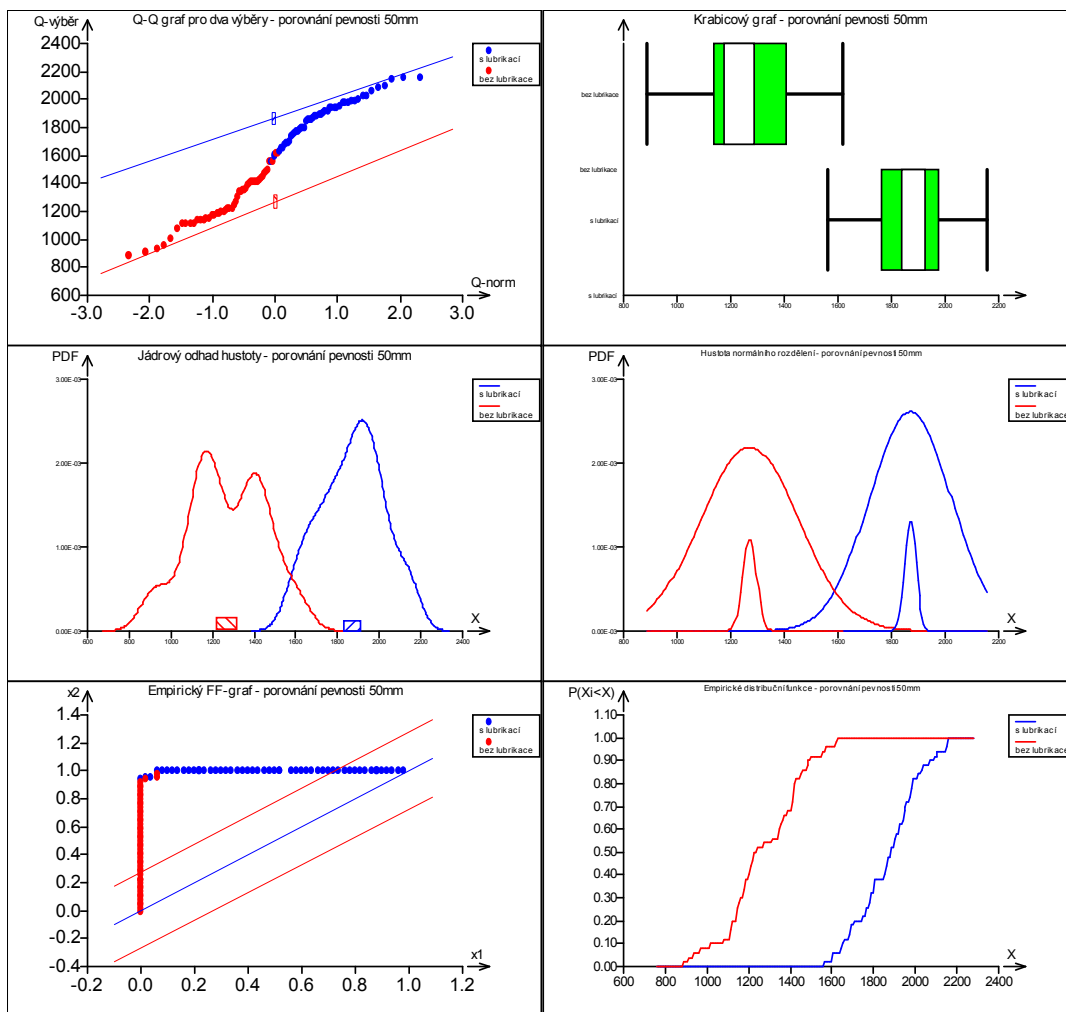
Název úlohy :	porovnání pevnosti 10mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	50	50
Průměr :	1826,389778	1330,696667
Směr. odchylka :	138,2849469	202,1367926
Rozptyl :	19122,72653	40859,28293
Korel. koef. R(x,y) :	0,2117567686	
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,136687091	
Počet stupňů volnosti :	49	49
Kritická hodnota :	1,588857329	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,004134869314	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,136687091	
Redukované stupně volnosti :	33	33
Kritická hodnota :	1,762645793	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,01494191296	
Test shody průměrů pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	14,31157332	
Počet stupňů volnosti :	98	
Kritická hodnota :	1,984467455	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	9,55049043E-026	
Test shody průměrů pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	14,31157332	
Redukované stupně volnosti :	87	
Kritická hodnota :	1,987608282	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,387598375E-024	



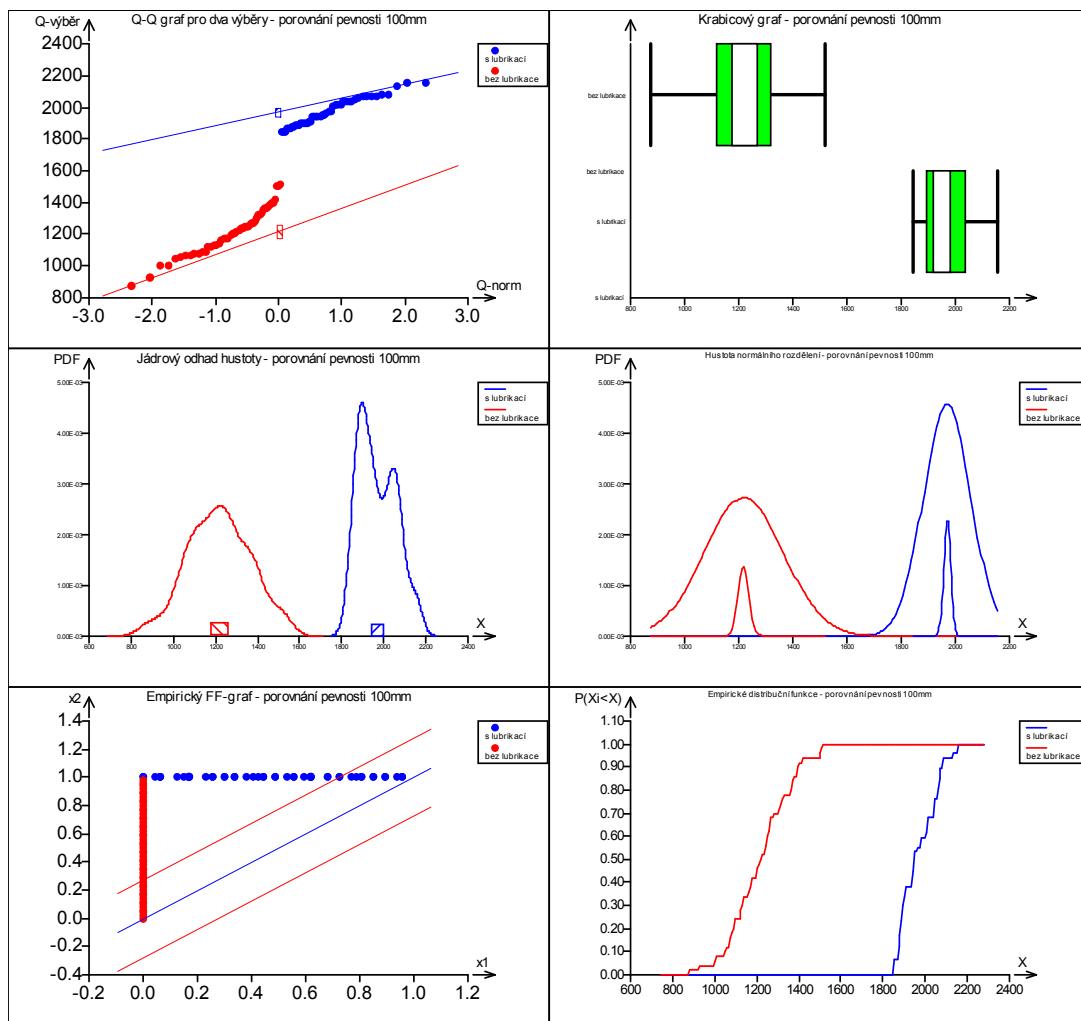
Název úlohy :	porovnání pevnosti 20mm	
Data: Všechna		
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	49	50
Průměr :	1819,764853	1360,163556
Směr. odchylka :	117,182938	158,7450743
Rozptyl :	13731,84096	25199,99861
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,835150778	
Počet stupňů volnosti :	49	48
Kritická hodnota :	1,593808823	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,01712339679	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,835150778	
Redukované stupně volnosti :	18	18
Kritická hodnota :	2,260547205	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,1124586282	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	16,36254263	
Počet stupňů volnosti :	97	
Kritická hodnota :	1,984723186	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,190272379E-029	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	16,41180322	
Redukované stupně volnosti :	90	
Kritická hodnota :	1,986674541	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	8,460890914E-029	



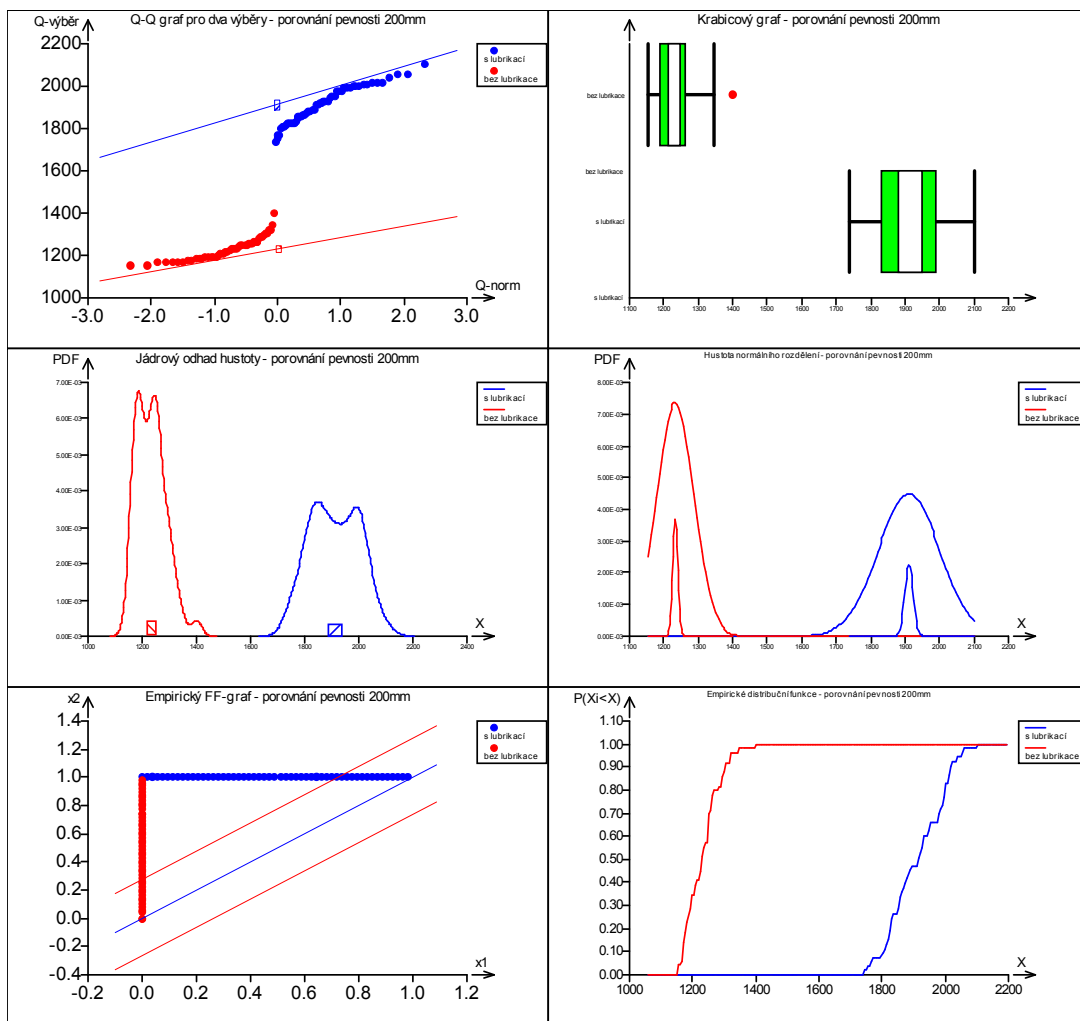
Název úlohy :	porovnání pevnosti 50mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	50	50
Průměr :	1870,45215	1270,863556
Směr. odchylka :	152,7151533	182,5840292
Rozptyl :	23321,91806	33336,92772
Korel. koef. R(x,y) :	0,1112368886	
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,429424786	
Počet stupňů volnosti :	49	49
Kritická hodnota :	1,588857329	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,09897838125	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,429424786	
Redukované stupně volnosti :	26	26
Kritická hodnota :	1,898407549	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,1697787515	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	17,8116644	
Počet stupňů volnosti :	98	
Kritická hodnota :	1,984467455	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,717789211E-032	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	17,8116644	
Redukované stupně volnosti :	95	
Kritická hodnota :	1,985251004	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	4,885999167E-032	



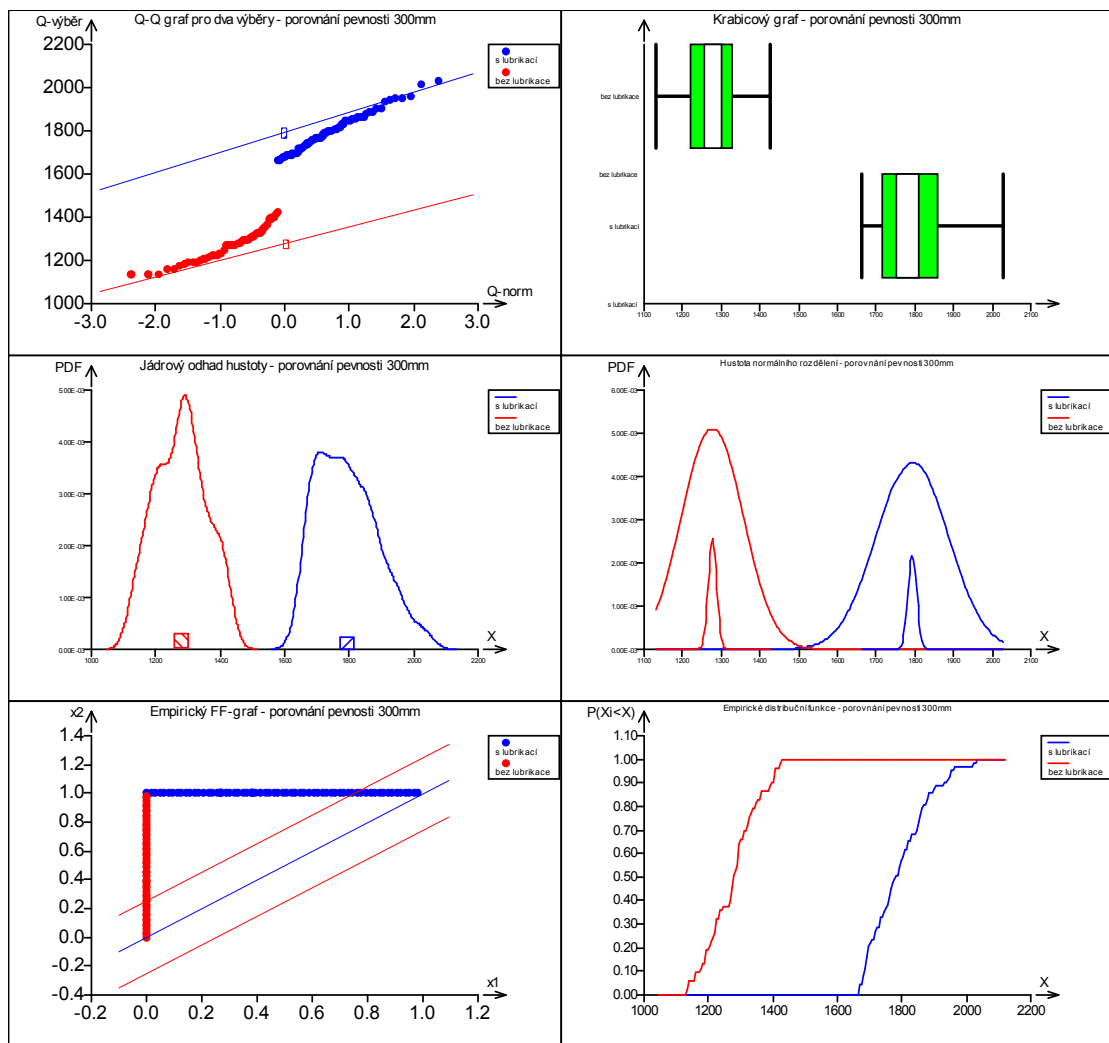
Název úlohy :	porovnání pevnosti 100mm	
Data: Všechna		
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	47	50
Průměr :	1969,843191	1218,356
Směr. odchylka :	87,13448313	146,2430215
Rozptyl :	7592,418151	21387,02135
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,816891921	
Počet stupňů volnosti :	49	46
Kritická hodnota :	1,604351287	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0002554743667	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,816891921	
Redukované stupně volnosti :	18	17
Kritická hodnota :	2,301866577	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,02054364537	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	30,49999626	
Počet stupňů volnosti :	95	
Kritická hodnota :	1,985251004	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	7,245290169E-051	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	30,95710039	
Redukované stupně volnosti :	81	
Kritická hodnota :	1,989686323	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,1980055E-046	



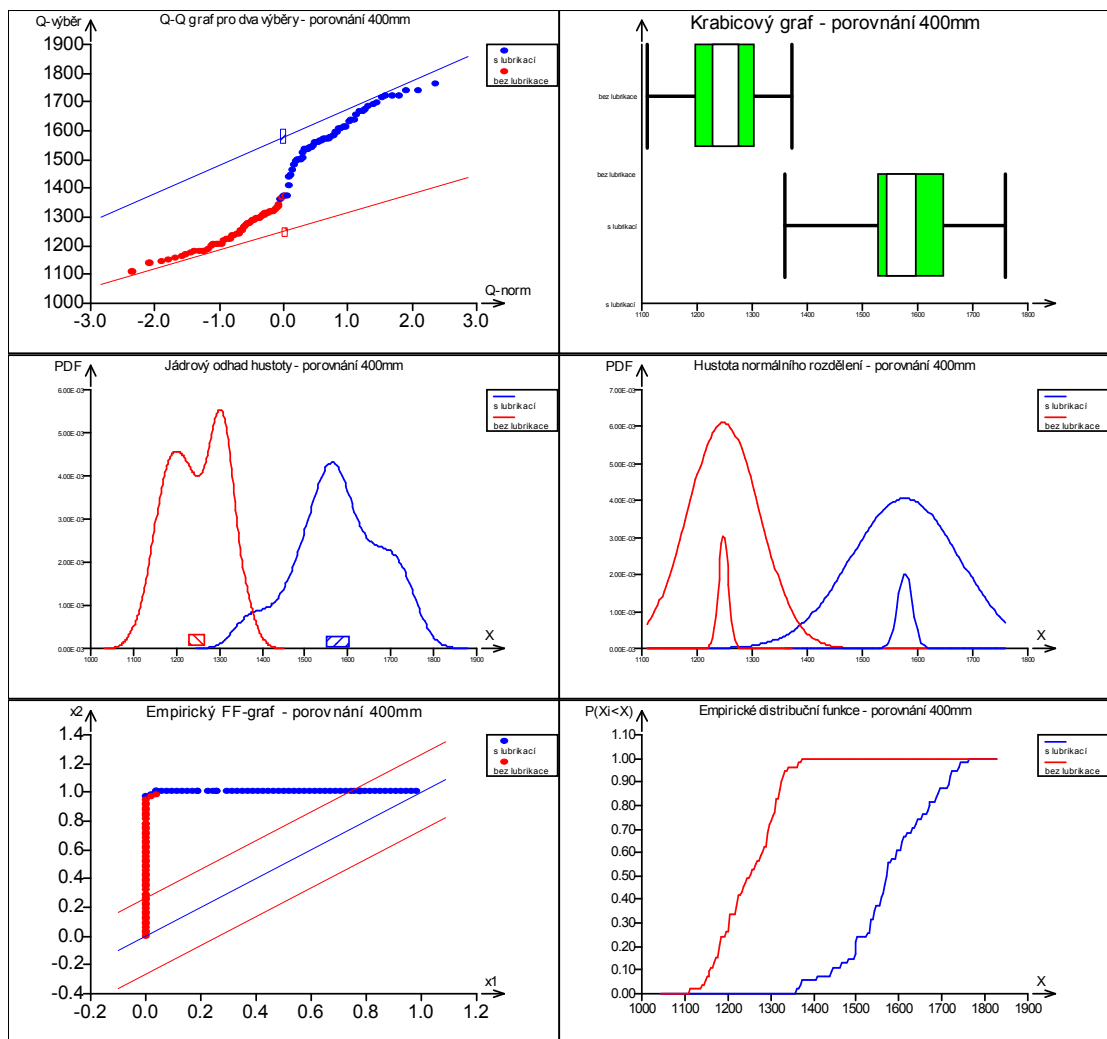
Název úlohy :	porovnání pevnosti 200mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	53	49
Průměr :	1911,316651	1233,154286
Směr. odchylka :	89,15934535	54,18605744
Rozptyl :	7949,388863	2936,128821
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,707438722	
Počet stupňů volnosti :	52	48
Kritická hodnota :	1,585879673	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0003020509667	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,707438722	
Redukované stupně volnosti :	24	23
Kritická hodnota :	2,005009458	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,009873955479	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	45,96171152	
Počet stupňů volnosti :	100	
Kritická hodnota :	1,983971519	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	4,64236473E-069	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	46,80774008	
Redukované stupně volnosti :	87	
Kritická hodnota :	1,987608282	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,79882771E-063	



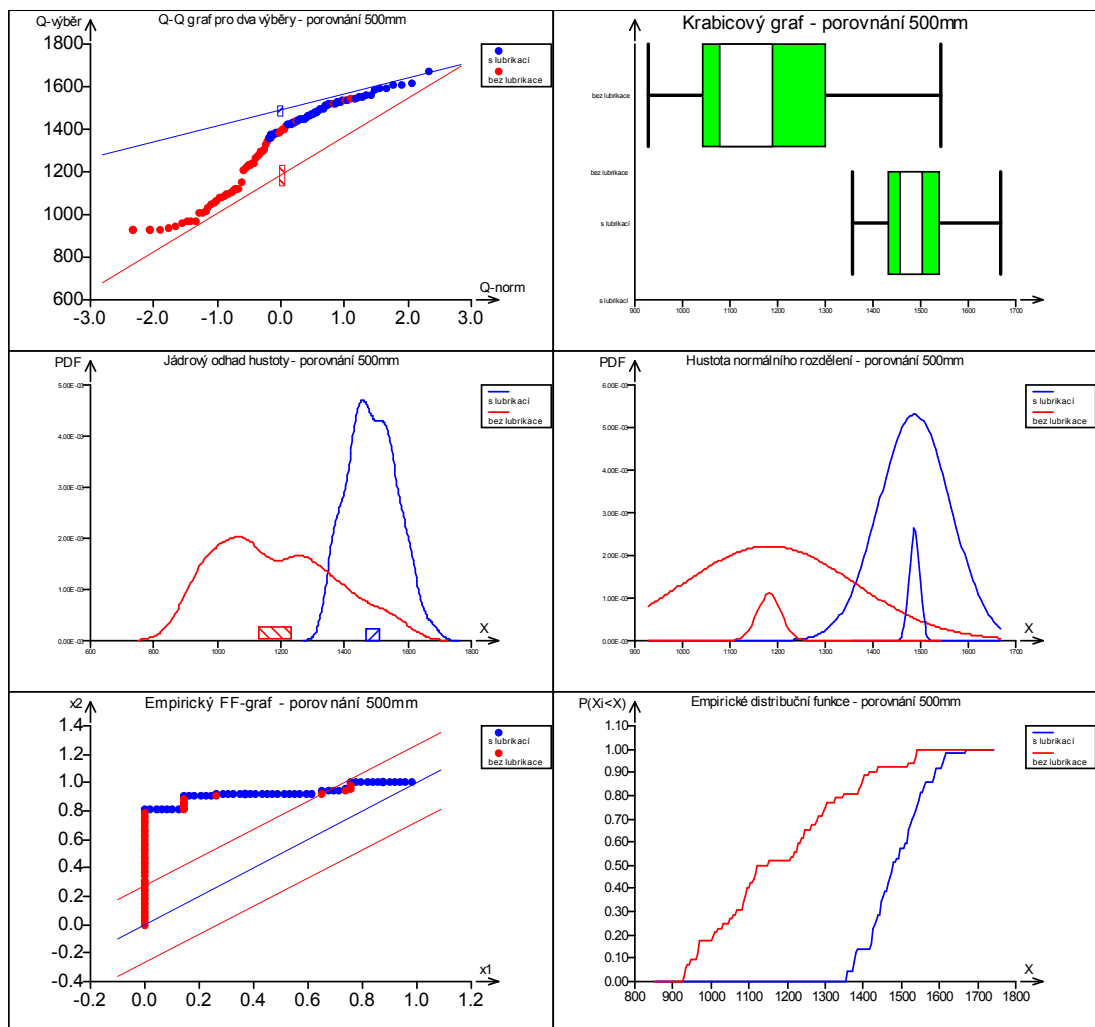
Název úlohy :	porovnání pevnosti 300mm	
Data: Všechna		
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	63	53
Průměr :	1793,621111	1276,894104
Směr. odchylka :	92,29126968	78,22646188
Rozptyl :	8517,678459	6119,379338
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,391918688	
Počet stupňů volnosti :	62	52
Kritická hodnota :	1,545321237	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,1022976261	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,391918688	
Redukované stupně volnosti :	31	26
Kritická hodnota :	1,86551976	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,1811356581	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	32,17582259	
Počet stupňů volnosti :	114	
Kritická hodnota :	1,980992298	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	4,943497684E-059	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	32,63755189	
Redukované stupně volnosti :	114	
Kritická hodnota :	1,980992298	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,14050856E-059	



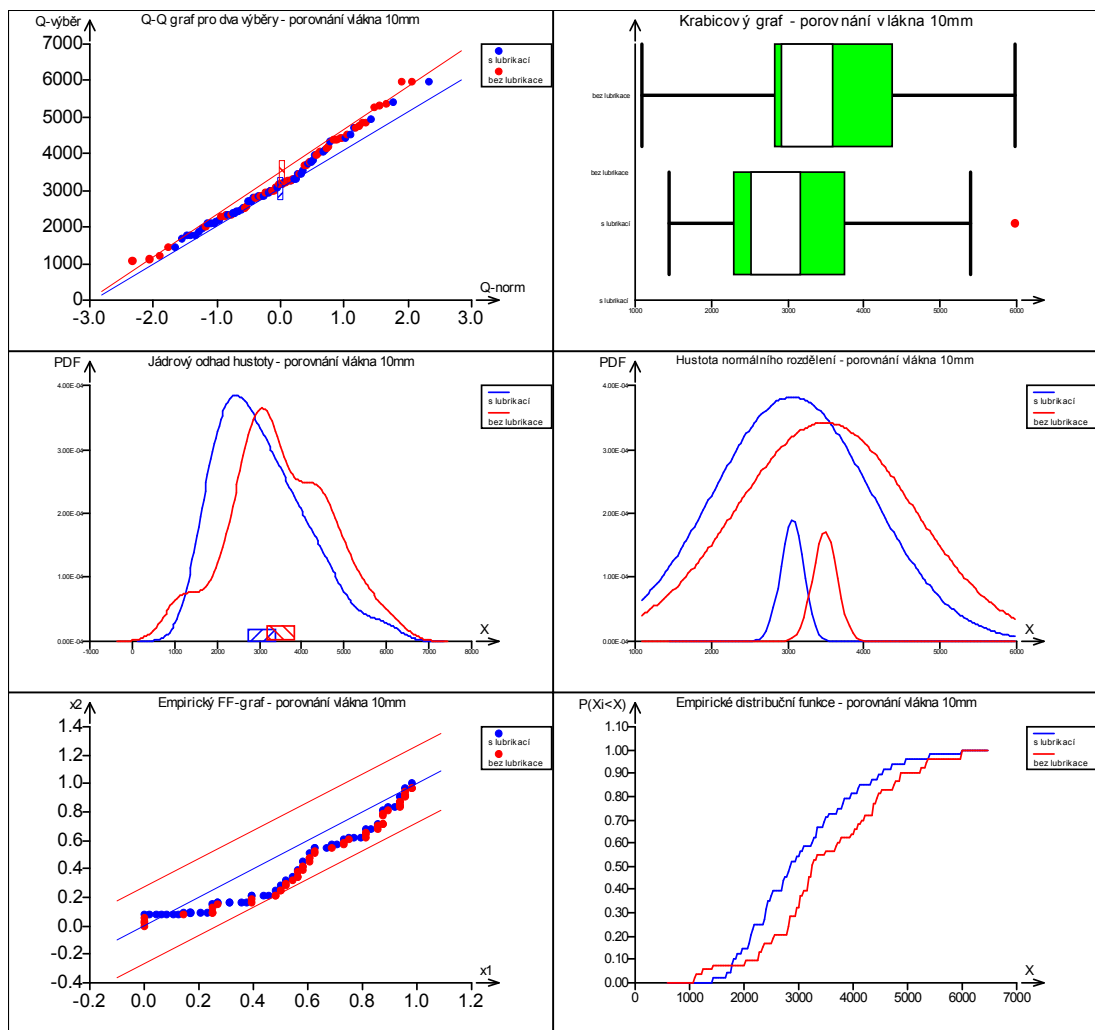
Název úlohy :	porovnání 400mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	54	53
Průměr :	1577,318426	1248,035613
Směr. odchylka :	98,32373126	65,36966466
Rozptyl :	9667,556129	4273,193057
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,26237289	
Počet stupňů volnosti :	53	52
Kritická hodnota :	1,564575533	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,001721371322	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,26237289	
Redukované stupně volnosti :	22	22
Kritická hodnota :	2,083606748	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,03348987217	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	20,36034641	
Počet stupňů volnosti :	105	
Kritická hodnota :	1,982815274	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	3,024082854E-038	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	20,43481137	
Redukované stupně volnosti :	92	
Kritická hodnota :	1,986086317	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	5,800981659E-036	



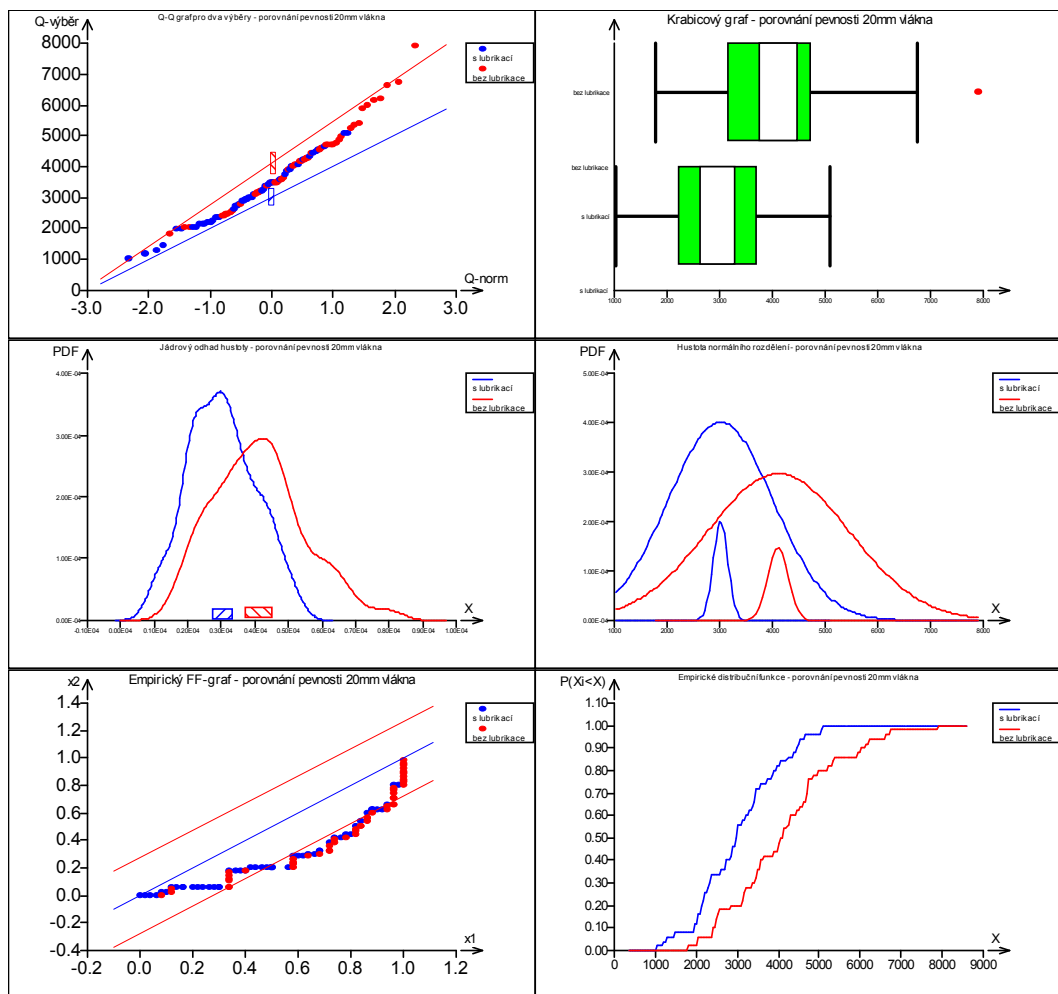
Název úlohy :	porovnání 500mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	49	52
Průměr :	1487,523571	1182,242521
Směr. odchylka :	75,15862399	179,9331732
Rozptyl :	5648,81876	32375,94683
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	5,731454346	
Počet stupňů volnosti :	51	48
Kritická hodnota :	1,58843016	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	4,599237778E-009	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	5,731454346	
Redukované stupně volnosti :	19	18
Kritická hodnota :	2,246048103	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0002753244234	
Test shody průměrů pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	11,00383355	
Počet stupňů volnosti :	99	
Kritická hodnota :	1,984216952	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	7,163182484E-019	
Test shody průměrů pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	11,23833976	
Redukované stupně volnosti :	69	
Kritická hodnota :	1,994945415	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	3,04336721E-017	



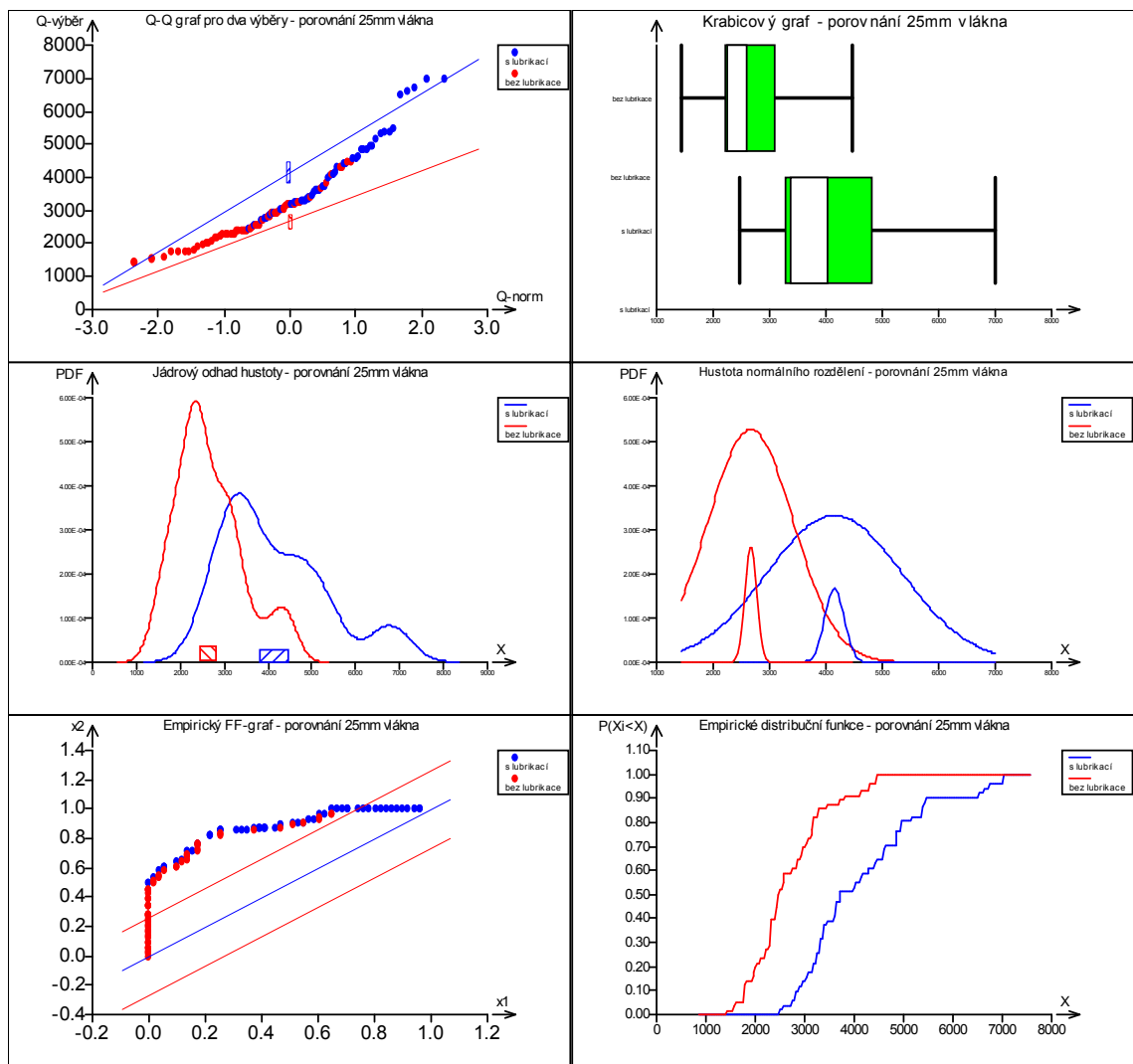
Název úlohy :	porovnání vlákna 10mm	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	48	53
Průměr :	3059,834854	3488,921156
Směr. odchylka :	1044,536483	1167,495318
Rozptyl :	1091056,465	1363045,317
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,249289437	
Počet stupňů volnosti :	52	47
Kritická hodnota :	1,591073048	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,2031996061	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,249289437	
Redukované stupně volnosti :	22	20
Kritická hodnota :	2,139831949	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,3365008439	
Test shody průměrů pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	1,938648792	
Počet stupňů volnosti :	99	
Kritická hodnota :	1,984216952	
Závěr :	Průměry jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,05539187509	
Test shody průměrů pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	1,949422257	
Redukované stupně volnosti :	99	
Kritická hodnota :	1,984216952	
Závěr :	Průměry jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,05407456853	



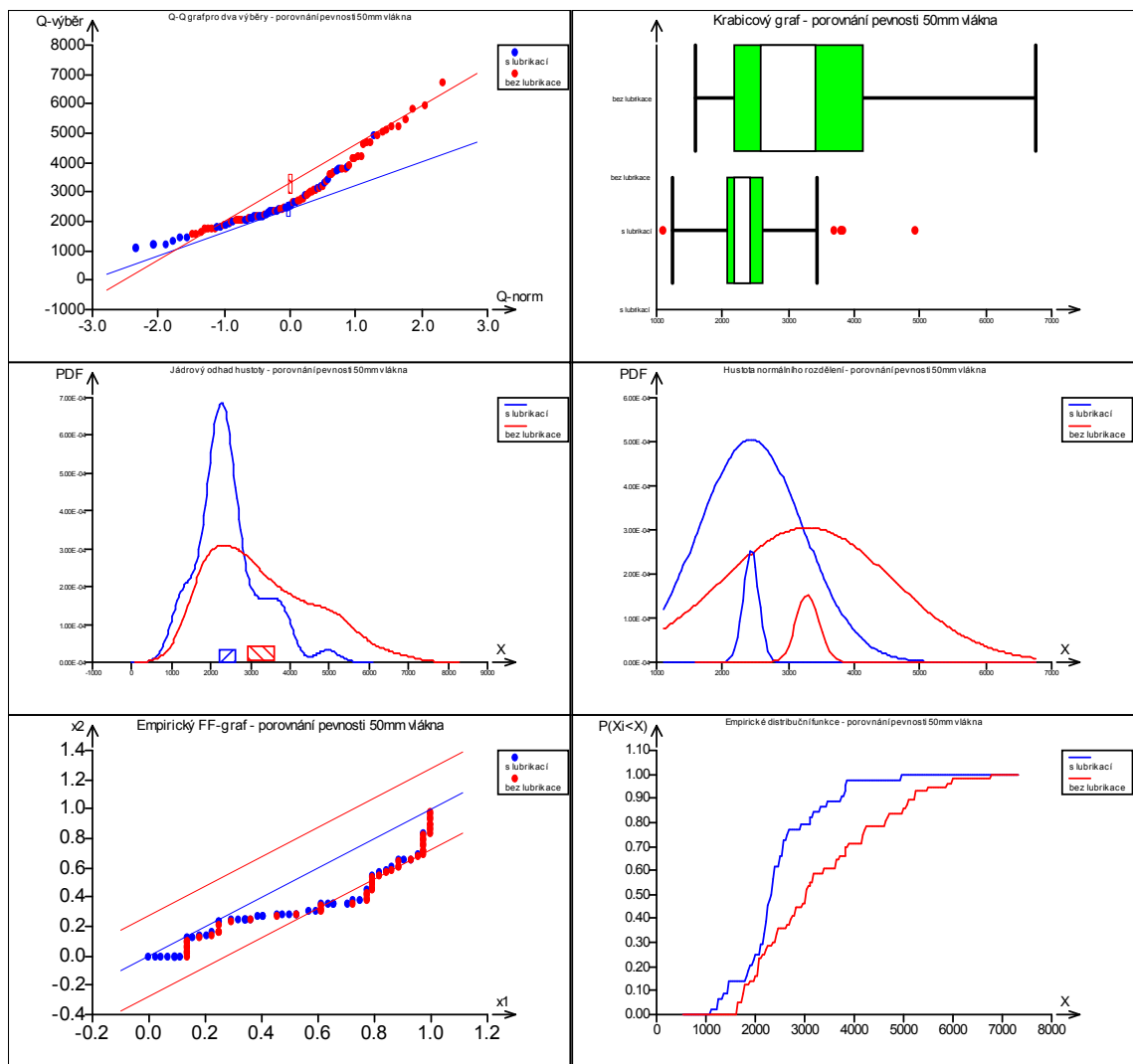
Název úlohy :	porovnání pevnosti 20mm vlákna	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	50	50
Průměr :	3016,572636	4116,127955
Směr. odchylka :	996,5973063	1345,661582
Rozptyl :	993206,1908	1810805,093
Korel. koef. R(x,y) :	0,02389259414	
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,823191508	
Počet stupňů volnosti :	49	49
Kritická hodnota :	1,588857329	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,01747010921	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,823191508	
Redukované stupně volnosti :	19	19
Kritická hodnota :	2,209388949	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,1082705267	
Test shody průměrů pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	4,643144582	
Počet stupňů volnosti :	98	
Kritická hodnota :	1,984467455	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	1,066264037E-005	



Název úlohy :	porovnání 25mm vlákna	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	51	56
Průměr :	4152,310093	2667,187766
Směr. odchylka :	1197,811746	756,022899
Rozptyl :	1434752,979	571570,6238
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,510193699	
Počet stupňů volnosti :	50	55
Kritická hodnota :	1,560081143	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0004677996758	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,510193699	
Redukované stupně volnosti :	17	18
Kritická hodnota :	2,276560569	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,03274791541	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	7,740319464	
Počet stupňů volnosti :	105	
Kritická hodnota :	1,982815274	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	6,455801348E-012	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	7,58475696	
Redukované stupně volnosti :	83	
Kritická hodnota :	1,98895978	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	4,33967518E-011	



Název úlohy :	porovnání pevnosti 50mm vlákna	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	44	56
Průměr :	2435,192502	3292,857741
Směr. odchylka :	791,8718039	1308,87177
Rozptyl :	627060,9539	1713145,31
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,732023577	
Počet stupňů volnosti :	55	43
Kritická hodnota :	1,607246344	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0004020152726	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	2,732023577	
Redukované stupně volnosti :	20	16
Kritická hodnota :	2,321745698	
Závěr :	Rozptyly jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,02491049376	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	3,828457887	
Počet stupňů volnosti :	98	
Kritická hodnota :	1,984467455	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,0002273152238	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	4,050132129	
Redukované stupně volnosti :	93	
Kritická hodnota :	1,985801814	
Závěr :	Průměry jsou ROZDÍLNÉ	
Pravděpodobnost :	0,000105961992	



Název úlohy :	porovnání pevnosti 100mm vlákna	
Data:	Všechna	
Hladina významnosti :	0,05	
Porovnávané sloupce :	s lubrikací	bez lubrikace
Počet dat :	49	48
Průměr :	2527,239213	2430,43871
Směr. odchylka :	836,8242886	989,7186787
Rozptyl :	700274,8899	979543,063
Test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,398797925	
Počet stupňů volnosti :	47	48
Kritická hodnota :	1,59959327	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,115444312	
Robustní test shody rozptylů		
Poměr rozptylů :	1,398797925	
Redukované stupně volnosti :	20	21
Kritická hodnota :	2,133942128	
Závěr :	Rozptyly jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,2447043724	
Test shody průměrů		
pro SHODNÉ rozptyly		
t-statistika :	0,5205646052	
Počet stupňů volnosti :	95	
Kritická hodnota :	1,985251004	
Závěr :	Průměry jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,6038812697	
Test shody průměrů		
pro ROZDÍLNÉ rozptyly		
t-statistika :	0,5196637769	
Redukované stupně volnosti :	92	
Kritická hodnota :	1,986086317	
Závěr :	Průměry jsou SHODNÉ	
Pravděpodobnost :	0,6045460235	